

# **COMPORTAMENTO AO CORTE E À FLEXÃO DE VIGAS COM BETÕES INCORPORANDO NANOPARTÍCULAS**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Civil: Especialização em Construção Urbana

**Autor**

**João Vítor Ferreira e Silva**

**Orientadores**

**Prof. Doutor Ricardo Nuno Francisco do Carmo**

Instituto Politécnico de Coimbra  
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Prof. Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa**

Instituto Politécnico de Coimbra  
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra, novembro 2015**



*Commencer à penser, c'est commencer d'être miné*

(Começar a pensar, é começar a ser consumido)

Albert Camus

*Nota:* caso seja necessário algum elemento para consulta referente à presente dissertação (*i.e.* explicação de cálculos, fotografias, entre outros) contactar o autor que, dentro do possível, responderá às referidas solicitações.



## AGRADECIMENTOS

No fundo, a curiosidade surge da natureza intrinsecamente inquieta da minha alma e empurra-me para a disquisição, onde não existe maior perfeição que duvidar. Porém, nela é fácil perder-me, mas, confesso, nunca a desejo tanto como quando perdido nela me encontro. No entanto, essa feição não a conseguiria unicamente por minha virtude - insignes pessoas me guiaram inevitavelmente até este ponto, permitindo-me moldá-la, e cujas notórias ações não se ousam confessar nos nossos dias.

Assim:

- do Professor Ricardo Carmo adquiri o mais essencial, a força de quebrar fronteiras, a vontade de resolver enigmas, a devoção, o horror à desistência e a necessidade insaciável de querer *brincar* com o betão;
- do Professor Hugo Costa retirei o apoio inquestionável, a tranquilidade e a paciência;
- das investigadoras Cátia Lourenço e Eliana Soldado guardo a dedicação pelo trabalho, a serena compreensão e o meigo guiar;
- do meu colega de mestrado e amigo Rui Ismael usurpei a mais profunda cumplicidade, a inabalável dedicação e uma simbiose de árduo trabalho;
- do Técnico de Laboratório António Amaral cobreí tempestuosos ofícios e agradavelmente discursivos exórdios dos dias;
- de meus amigos coletei o seu tempo irrecuperável, mas também os seus afetos e os seus auxílios;
- de meus pais recolhi o conter, as paixões incondicionais e todo o incontrolável desejo de me quererem dar o que ainda não me pertence;
- e, para concluir, do Professor José Raposo, a quem dedico esta dissertação, recebi o prazer obsessivo pela matemática (inspiração de uma vida) que me precipitou para um avanço irreparável do qual não quero nunca deixar de ser presa.

A todos eles devo mérito e a eles faço o tributo merecido que nunca poderia ser calado, e *o resto é silêncio*. Obrigado.



## RESUMO

Existe uma crescente preocupação com a sustentabilidade e com o impacto ambiental da atividade da construção que, desde o início do séc. XXI, com o avanço exponencial da nanotecnologia e do estudo das nanopartículas (para incorporação em argamassas e betões), tem vindo a ser atendida de uma forma inovadora.

As nanopartículas, quando substituindo pequenas percentagens da massa de cimento, conferem características melhoradas às misturas: resistência, durabilidade, entre outras. Os potenciais benefícios no betão são variados e estão, genericamente, identificados. Todavia, existem ainda algumas lacunas (*e.g.* estudos que incluam ensaios estruturais). Tendo este aspeto em conta, foi formado um consórcio entre a empresa *Smart Innovation, Lda* e o *Instituto Superior de Engenharia de Coimbra* por forma a conduzir uma investigação com o intuito de estudar o efeito da incorporação das nanopartículas em argamassas e betões.

Inserindo-se a presente dissertação no âmbito desse projeto de investigação, decidiu-se estudar o comportamento de vigas de betão incorporando nanopartículas (ou nanobetão) quando sujeitas a esforços de corte e de flexão, comparando-o com o de betões de referência. Foram, então, realizados dois tipos de ensaios, para as mesmas misturas (que incluem betões simples, com nanopartículas, com fibras e com nanopartículas e fibras em conjunto): (i) ao corte – em que se submeteram oito vigas, simplesmente apoiadas, à aplicação de uma carga concentrada a 0,85 *m* do apoio mais afastado; (ii) à flexão – em que se submeteram também oito vigas, simplesmente apoiadas, à aplicação de uma carga concentrada a meio vão.

Com base nos dados recolhidos durante os ensaios experimentais, estudou-se: a relação carga-deslocamento, os valores teóricos e experimentais do esforço transversal e do momento, a curvatura, a rigidez, a fendilhação e o tipo de rotura.

Da análise de resultados, foi possível observar que o comportamento estrutural de vigas de betão incorporando nanopartículas não evidencia, de forma clara, as previsões dos ensaios de caracterização dos betões. Porém, verificou-se que existe alguma potencialidade da incorporação das nanopartículas (principalmente as nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) beneficiarem a resistência ao corte e à flexão. Foi ainda possível observar que a interação entre nanopartículas e fibras de aço induz efeitos negativos na resistência ao corte e a resistência à flexão.

Palavras-chave: betão, nanopartículas, fibras, resistência, corte, flexão, vigas.





## ABSTRACT

There is an increasing concern with the sustainability and the environmental impact of the construction field which, since the beginning of the 21<sup>st</sup> century, with an exponential progress of nanotechnology and of the study of nanoparticles (for use in mortar and concrete), has been met in an innovating way.

Nanoparticles, when replacing small dosages of cement, improve the properties of mixtures: resistance, durability, among others. Its benefits on concrete are wide and are, generically, identified. However, there are still some existing gaps (*e.g.* studies which include structural testing). Having that in mind, a partnership between *Smart Inovation, Lda* and *Instituto Superior de Engenharia de Coimbra* was formed in order to start an investigation with the goal of studying the effect of nanoparticles on mortar and concrete.

Being that this thesis is part of the mentioned investigation, it was agreed to study the behaviour of concrete beams with nanoparticles (or nanoconcrete) under shear and flexure stress, comparing it with the behaviour of standard concrete beams. Hence, two types of test methods, for the same mixtures (which include standard concrete, nanoconcrete, fibres and nanoconcrete with fibres), were performed: (i) shear testing – where eight beams were tested on simply supported conditions and a load was applied at a distance of 0.85 *m* from the farthest support point; (ii) flexure testing – where eight beams were tested, also on simply supported conditions, and a load was applied in the middle.

Based on the gathered experimental data, the following parameters were studied: force-deflection, design and experimental values of the shear and flexural strength, curvature, stiffness, cracking and failure type.

By analysing the obtained experimental results, it was possible to observe that the mechanical behaviour of concrete beams containing nanoparticles does not reflect, in a clear way, the predictions ascertained with the concrete profiling tests. Nevertheless, it was observed that there is some potential increase in shear and flexure resistance when using nanoparticles in concrete (especially  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles). It was also possible to verify that there is a negative effect on the shear and flexure resistance when combining nanoparticles and steel fibres.

**Keywords:** concrete, nanoparticles, fibres, resistance, shear, flexure, beam.



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
ÍNDICE.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xvii
ÍNDICE DE QUADROS .....	xxi
SIMBOLOGIA .....	xxiii
ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS .....	xxvii
Capítulo 1 – Introdução .....	1
1.1. Enquadramento do Tema.....	1
1.2. Objetivos e Metodologia .....	2
1.3. Organização do Trabalho.....	2
Capítulo 2 – Betões Incorporando Nanopartículas .....	5
2.1. Descrição .....	5
2.2. Fabrico de Nanopartículas .....	6
2.3. Propriedades .....	7
Capítulo 3 – Betões Incorporando Fibras Metálicas .....	13
3.1. Descrição .....	13
3.2. Tipos de Fibras .....	13
3.2.1 Fibras Metálicas .....	14
3.3. Comportamento das Fibras de Aço no Betão .....	16
3.3.1. Estrutura da Matriz.....	16
3.3.2. Orientação, Distribuição e Volume de Fibras .....	16
3.3.3. Mecanismos de Reforço .....	18
3.4. Fibras de Aço em Nanobetões .....	19

3.5. Aplicações de Betões com Fibras de Aço .....	20
Capítulo 4 – Resistência ao Corte e Resistência à Flexão .....	21
4.1. Corte.....	21
4.1.1. O Fenómeno do Esforço Transverso - Caso Geral .....	21
4.1.2. Rotura por Esforço Transverso em Vigas.....	22
4.1.2.1. Rotura por Esmagamento da Biela de Compressão .....	23
4.1.2.2. Rotura por Falha de Ancoragem no Apoio .....	23
4.1.2.3. Rotura por Falha da Armadura Transversal .....	24
4.1.2.4. Rotura por Compressão do Bordo Superior.....	24
4.1.2.5. Rotura por Falha da Armadura Longitudinal .....	25
4.1.3. Resistência ao Esforço Transverso em Vigas .....	26
4.1.3.1. Vigas Sem Reforço ao Esforço Transverso .....	26
4.1.3.2. Vigas Reforçadas com Etribos .....	27
4.1.3.3. Vigas Reforçadas com Fibras de Aço .....	28
4.2. Flexão.....	29
4.2.1. O Fenómeno da Flexão - Caso Geral.....	29
4.2.2. Rotura por Flexão em Vigas .....	29
4.2.2.1. Deformação Plástica Excessiva do Aço.....	30
4.2.2.2. Rotura do Betão .....	30
4.2.3. Resistência à Flexão em Vigas .....	31
4.2.3.1. Vigas Reforçadas com Armadura .....	31
4.2.3.2. Vigas Reforçadas com Fibras de Aço .....	31
4.3. Regulamentação .....	32
4.3.1. Eurocódigo 2.....	32
4.3.2. RILEM TC 162 - TDF.....	33
4.3.3. Outra .....	33
Capítulo 5 – Programa Experimental.....	35

5.1. Evolução do Projeto de Investigação .....	35
5.2. Caracterização das Misturas .....	36
5.2.1. Composições .....	36
5.2.2. Materiais.....	39
5.2.2.1. Ligantes .....	39
5.2.2.2. Agregados.....	40
5.2.2.3. Nanopartículas .....	41
5.2.2.4. Adjuvante e Água .....	42
5.2.2.5. Fibras .....	43
5.3. Caracterização das Armaduras .....	44
5.4. Características Resistentes do Betão .....	45
5.4.1. Ensaio do Betão no Estado Endurecido .....	46
5.4.1.1. Massa Volúmica .....	46
5.4.1.2. Resistência à Compressão .....	46
5.4.1.3. Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	47
5.4.1.4. Módulo de Elasticidade .....	48
5.4.1.5. Resistências à Tração por Flexão .....	49
5.4.1.6. Resultados.....	51
5.5. Ensaio das Vigas ao Corte e à Flexão .....	52
5.5.1. Apresentação .....	52
5.5.2. Descrição das Vigas .....	54
5.5.2.1. Armaduras das Vigas para o Ensaio ao Corte .....	55
5.5.2.2. Armaduras das Vigas para o Ensaio à Flexão .....	56
5.5.2.3. Produção das Vigas .....	57
5.5.3. Descrição dos Ensaio e Instrumentação .....	60
Capítulo 6 – Análise de Resultados .....	67
6.1. Análise do Comportamento ao Corte .....	67

6.1.1. Relação Carga - Deslocamento.....	67
6.1.2. Análise dos Valores de Esforço Transverso .....	69
6.1.2.1. Esforço Transverso Teórico .....	69
6.1.2.2. Esforço Transverso Máximo (Experimental).....	72
6.1.2.3. Relação $V_{teo} / V_{máx}$ .....	74
6.1.3. Erro na Medição da Carga Aplicada.....	74
6.1.4. Fendilhação e Tipo de Rotura.....	75
6.2. Análise do Comportamento à Flexão.....	79
6.2.1. Relação Carga - Deslocamento.....	79
6.2.2. Análise dos Valores de Momento.....	83
6.2.2.1. Momento Teórico.....	83
6.2.2.2. Momento Máximo (Experimental) .....	86
6.2.2.3. Relação $M_{teo} / M_{máx}$ .....	88
6.2.2.4. Relação Momento - Curvatura.....	88
6.2.3. Análise da Rigidez.....	90
6.2.3.1. Rigidez Teórica .....	91
6.2.3.2. Rigidez Experimental.....	92
6.2.3.3. Relação $EI_{teo} / EI_{exp}$ .....	94
6.2.4. Erro na Medição da Carga Aplicada.....	97
6.2.5. Fendilhação e Tipo de Rotura.....	97
Capítulo 7 – Conclusões Principais e Desenvolvimentos Futuros.....	103
7.1. Conclusões Principais .....	103
7.2. Desenvolvimentos Futuros.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	a
Anexo A – Medições das Vigas .....	g
Anexo B – Relação Carga-Deslocamento – Corte.....	i
Anexo C – Cálculo do $V_{teo}$ .....	k

Anexo D – Relação $V_{máx} - f_{cm,cil}$ .....	m
Anexo E – Relação Carga-Deslocamento - Flexão .....	o
Anexo F – Cálculo do $M_{teo}$ .....	q
Anexo G – Relação $M_{máx} - f_{cm,cil}$ .....	u
Anexo H – Determinação da Curvatura Experimental .....	w
Anexo I – Relação $M - I/r$ .....	y
Anexo J – Cálculo do $EI_{I,teo}$ e do $EI_{II,teo}$ .....	aa





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Aspeto microscópico (SEM) de nanopartículas de alumina - $Al_2O_3$ ( <i>Smart Innovation, Lda</i> ) .....	6
Figura 2.2 – Dimensão de partículas de materiais relacionados com o betão (adaptado de Sanchez e Sobolev, 2010).....	8
Figura 2.3 – Ganhos da resistência à compressão de argamassas com nanopartículas (adaptado de Lourenço <i>et al</i> , 2015).....	9
Figura 2.4 – Penetração de cloretos em mistura com $SiO_2$ (adaptado de Jalal <i>et al</i> , 2012) .....	11
Figura 3.1 – Exemplos de geometrias típicas de fibras (adaptado de Löfgren, 2005) .....	14
Figura 3.2 – Exemplos de tipos de fibras metálicas (Sousa, 2014).....	15
Figura 3.3 – Tipos de fibras de aço existentes, relativamente à sua geometria (adaptado de Naaman, 2003) .....	15
Figura 3.4 – Representação esquemática de vários tipos de compósitos com fibras (adaptado de Löfgren, 2005) .....	17
Figura 3.5 – Mecanismos de absorção de energia em BRF (adaptado de Zollo, 1997 e Ferreira, 2008) .....	18
Figura 3.6 – Esquemas de concentração de tensões (adaptado de Barros, 2009).....	19
Figura 4.1 - Trajetória de tensões de uma viga em estado não fendilhado (adaptado de Câmara, 2014) .....	21
Figura 4.2 - Fendilhação de uma viga (adaptado de Câmara, 2014) .....	22
Figura 4.3 – Rotura por esmagamento da biela de compressão (adaptado de Barros, 2009)...	23
Figura 4.4 – Rotura por falha de ancoragem no apoio (adaptado de Barros, 2009).....	24
Figura 4.5 – Rotura por falha da armadura transversal (adaptado de Barros, 2009).....	24
Figura 4.6 – Rotura por compressão do bordo superior (adaptado de Barros, 2009).....	25
Figura 4.7 – Rotura por falha da armadura longitudinal (adaptado de Barros, 2009).....	25
Figura 4.8 – Mecanismos de resistência ao corte numa viga sem armadura transversal (adaptado de Nilson <i>et al</i> , 2010).....	26
Figura 4.9 - Pormenores dos mecanismos no esforço transversal (adaptado de Lúcio, 2006).....	27

Figura 4.10 – Mecanismos de resistência ao corte numa viga com armadura transversal vertical (adaptado de Nilson <i>et al</i> , 2010) .....	28
Figura 4.11 – Viga com e sem fibras de aço (adaptado de Vitt, 2011).....	28
Figura 4.12 - Deformação plástica do aço numa viga de betão armado .....	30
Figura 4.13 - Rotura do betão comprimido numa viga de betão armado.....	31
Figura 4.14 – Distribuição de tensões de um elemento em BRFA fendilhado (adaptado de Robins <i>et al</i> , 2001 e RILEM TC 162-TDF, 2003).....	32
Figura 5.1 – Evolução do programa experimental do projeto de investigação.....	35
Figura 5.2 – Aspeto macroscópico dos ligantes utilizados .....	39
Figura 5.3 – Aspeto macroscópico dos agregados finos .....	40
Figura 5.4 – Aspeto macroscópico dos agregados grossos .....	40
Figura 5.5 – Aspeto macroscópico das nanopartículas de SiO <sub>2</sub> .....	41
Figura 5.6 - Imagens SEM das nanopartículas ( <i>Smart Inovation, Lda</i> ).....	42
Figura 5.7 – Embalagem e aspeto do adjuvante <i>Glenium SKY 526</i> .....	43
Figura 5.8 – Aspeto macroscópico das fibras utilizadas .....	44
Figura 5.9 - Aspeto das armaduras utilizadas nas vigas .....	45
Figura 5.10 – Provetes cúbicos para ensaio à compressão (150×150×150 mm <sup>3</sup> ) .....	46
Figura 5.11 – Ensaio de resistência à compressão .....	47
Figura 5.12 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	48
Figura 5.13 – Determinação do módulo de elasticidade em provete prismático .....	49
Figura 5.14 – Ensaio de tração por flexão .....	49
Figura 5.15 – Diagramas carga-deslocamento dos ensaios tração por flexão – 550F0,5 .....	50
Figura 5.16 – Diagramas carga-deslocamento dos ensaios tração por flexão – 550Al2%F0,551	
Figura 5.17 – Esquema de ensaio e diagramas de esforços .....	53
Figura 5.18 – Corte transversal de viga-tipo – ensaio ao corte.....	55
Figura 5.19 – Corte longitudinal de viga-tipo – ensaio ao corte.....	55
Figura 5.20 – Corte transversal de viga-tipo – ensaio à flexão.....	56

Figura 5.21 – Corte longitudinal de viga-tipo - ensaio à flexão .....	56
Figura 5.22 – Esquema da cofragem das vigas em <i>CAD</i> <sup>®</sup> .....	57
Figura 5.23 – Cofragem metálica e armaduras .....	58
Figura 5.24 – Execução de amassaduras .....	58
Figura 5.25 – Betonagem (com vibração) e cura das vigas .....	59
Figura 5.26 – Descofragem e cura prolongada das vigas .....	59
Figura 5.27 - Pórtico de ensaio .....	60
Figura 5.28 - Esquema do pórtico de ensaio – ensaio ao corte .....	61
Figura 5.29 - Esquema do pórtico de ensaio – ensaio à flexão .....	62
Figura 5.30 – Viga preparada para ensaio – ensaio ao corte .....	62
Figura 5.31 - Viga preparada para ensaio – ensaio à flexão .....	63
Figura 5.32 – Esquema detalhado do equipamento de ensaio – ensaio ao corte .....	64
Figura 5.33 – Esquema detalhado do equipamento de ensaio – ensaio à flexão .....	65
Figura 5.34 - Célula de carga e equipamento de controlo e aquisição de dados .....	65
Figura 6.1 - Diagramas carga-deslocamento das vigas de ensaio ao corte .....	68
Figura 6.2 – Relação do esforço transversal máximo (experimental) entre as vigas com nanopartículas e fibras e as vigas de referência .....	73
Figura 6.3 – Primeira fenda de corte (1) .....	75
Figura 6.4 – Primeira fenda de corte (2) .....	76
Figura 6.5 – Padrão de fendilhação das vigas - ensaio ao corte (1) .....	76
Figura 6.6 – Padrão de fendilhação das vigas - ensaio ao corte (2) .....	77
Figura 6.7 – Pormenor da fenda de corte da viga V8c_550Al2F0,5 .....	77
Figura 6.8 – Ângulos da fenda de corte da viga V1c_350 .....	78
Figura 6.9 – Diagramas carga-deslocamento das vigas ensaio à flexão .....	79
Figura 6.10 – Evolução da deformação das vigas de ensaio à flexão (1) .....	81
Figura 6.11 – Evolução da deformação das vigas de ensaio à flexão (2) .....	82
Figura 6.12 – Deformação das vigas de ensaio à flexão – $F = 150\text{ kN}$ .....	83

Figura 6.13 – Distribuição tensões para cálculo do $M_{teo}$ - vigas sem fibras.....	84
Figura 6.14 - Distribuição de tensões para cálculo do $M_{teo}$ - vigas com fibras .....	85
Figura 6.15 – Relação do momento máximo (experimental) entre as vigas com nanopartículas e fibras e as vigas de referência .....	87
Figura 6.16 – Esquemas para cálculo da curvatura.....	89
Figura 6.17 – Diagramas momento-curvatura .....	90
Figura 6.18 – Diagrama $M-l/r$ para análise da rigidez experimental – V3f_350Al2% .....	92
Figura 6.19 – Comparação entre os valores teóricos e experimentais da rigidez (1) .....	95
Figura 6.20 - Comparação entre os valores teóricos e experimentais da rigidez (2) .....	96
Figura 6.21 – Evolução da rigidez com o momento .....	96
Figura 6.22 – Correspondência entre fendilhação e o diagrama carga-deslocamento – V4f_550 .....	98
Figura 6.23 – Correspondência entre fendilhação e o diagrama carga-deslocamento – V7f_550F0,5 .....	98
Figura 6.24 - Rotura das vigas de ensaio à flexão .....	99
Figura 6.25 – Padrão de fendilhação das vigas – ensaio à flexão.....	100
Figura 6.26 – Pormenor do destacamento das vigas de ensaio à flexão .....	101

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Propriedades físicas de algumas fibras (1) (adaptado de Löfgren, 2005) .....	13
Quadro 3.2 – Propriedades físicas de algumas fibras (2) (adaptado de Löfgren, 2005) .....	14
Quadro 3.3 – Aplicações do BRFA (adaptado de Barros, 1996 e Gomes, 2013) .....	20
Quadro 5.1 – Composição dos betões (1).....	37
Quadro 5.2 – Composição dos betões (2).....	38
Quadro 5.3 – Composição dos betões (3).....	38
Quadro 5.4 – Massas volúmicas dos ligantes .....	39
Quadro 5.5 – Massas volúmicas dos agregados .....	41
Quadro 5.6 – Massas volúmicas das nanopartículas .....	42
Quadro 5.7 – Propriedades das fibras utilizadas (adaptado de ArcelorMittal, 2010).....	44
Quadro 5.8 - Características estimadas do aço utilizado (EC2) .....	45
Quadro 5.9 – Ensaio de caracterização do betão realizados .....	45
Quadro 5.10 – Resultados dos ensaios de compressão, tração e módulo de elasticidade .....	51
Quadro 5.11 – Resultados dos ensaios de tração por flexão .....	52
Quadro 5.12 – Identificação das vigas.....	54
Quadro 6.1 – Valores de carga e flecha do ensaio ao corte.....	68
Quadro 6.2 – Valores teóricos do esforço transversal.....	71
Quadro 6.3 - Valores experimentais do esforço transversal.....	72
Quadro 6.4 – Relação entre valores teóricos e experimentais do esforço transversal.....	74
Quadro 6.5 – Inclinação das fendas de corte .....	78
Quadro 6.6 – Valores de carga e flecha do ensaio à flexão.....	80
Quadro 6.7 – Valores teóricos do momento .....	86
Quadro 6.8 – Valores experimentais do momento .....	87
Quadro 6.9 – Relação entre valores teóricos e experimentais do momento.....	88
Quadro 6.10 – Valores teóricos da rigidez .....	91

Quadro 6.11 – Valores experimentais da rigidez .....	93
Quadro 6.12 – Relação entre valores teóricos e experimentais da rigidez .....	94

## SIMBOLOGIA

### Gregas Maiúsculas

$\emptyset$  diâmetro do varão

### Gregas Minúsculas

$\alpha$  coeficiente de homogeneização

$\delta$  deslocamento/flecha

$\delta_{m\acute{a}x}$  deslocamento máximo

$\epsilon_c$  valor da extensão do betão

$\epsilon_{cu3}$  valor da extensão última do betão (EC2)

$\epsilon_{inf}$  valor da extensão inferior

$\epsilon_{lvdt,i}$  valor da extensão medida no LVDT horizontal inferior

$\epsilon_{lvdt,s}$  valor da extensão medida no LVDT horizontal superior

$\epsilon_s$  valor da extensão do aço na armadura tracionada

$\epsilon_s'$  valor da extensão do aço na armadura comprimida

$\epsilon_{su}$  valor da extensão de rotura do aço

$\epsilon_{sup}$  valor da extensão superior

$\epsilon_{sy}$  valor da extensão de cedência do aço

$\epsilon_{sy}$  valor da extensão de cedência do aço

$\theta_{fenda}$  inclinação da fenda de corte

$\rho$  taxa de armadura tracionada

$\rho'$  taxa de armadura comprimida

$\rho_l$  taxa de armadura longitudinal

$\sigma$  tensão

$\sigma_c$  tensão de compressão

$\sigma_t$  tensão de tração

$\tau_{fd}$  valor de dimensionamento relativo ao aumento da resistência ao corte devido às fibras

## Latinas Maiúsculas

$A_s$  área de aço das armaduras tracionadas

$A_s'$  área da aço das armaduras comprimidas

$A_{s,homog.}$  área de aço das armaduras tracionadas homogeneizadas

$A_{s,homog.}'$  área de aço das armaduras comprimidas homogeneizadas

$E_c$  valor do módulo de elasticidade do betão

$EI$  rigidez à flexão

$EI_{exp}$  valor experimental da rigidez à flexão

$EI_I$  valor da rigidez à flexão para o “Estado I”

$EI_{II}$  valor da rigidez à flexão para o “Estado II”

$EI_{teo}$  valor teórico (de cálculo) da rigidez à flexão

$E_s$  valor do módulo de elasticidade do aço

$F$  força ou carga aplicada

$F_{1^{a}fenda}$  força que origina a primeira fenda de corte

$F_c$  força no betão

$F_{c,t}$  força de tração nas fibras

$F_{máx}$  força máxima

$F_p$  força de rotura do provete de ensaio à tração por compressão diametral

$F_s$  força na armadura tracionada

$F_s'$  força na armadura comprimida

$I$  inércia

$M_{máx}$  valor máximo (experimental) do momento

$M_{teo}$  valor teórico (de cálculo) do momento

$V_a$  força na armadura longitudinal devido ao efeito de ferrolho



$V_c$	resultante das tensões de corte na zona comprimida
$V_d$	componente vertical da força de atrito entre as faces da fenda, devido ao imbricamento entre agregados
$V_{máx}$	valor máximo (experimental) do esforço transversal
$V_{teo}$	valor teórico (de cálculo) do esforço transversal
$V_w$	força de tração nas armaduras transversais, que atravessam as fendas de corte
$Z_G$	centro de inércia da seção

### Latinas Minúsculas

$1/r$	curvatura da seção
$a'$	distância entre a armadura comprimida e a face superior da secção/viga
$a_p$	aresta de menor dimensão do provete de ensaio à tração por compressão diametral
$b$	largura da seção/viga
$b_R$	largura do provete de ensaio à tração por flexão
$d$	altura útil da seção
$d_f$	diâmetro das fibras
$eh$	comprimento medido na horizontal, dos LVDTs horizontais
$ev$	distância, medida na vertical, entre os LVDTs horizontais
$f_c$	valor da tensão de rotura do betão à compressão
$f_{ck}$	valor característico da tensão de rotura do betão à compressão
$f_{cm,cil}$	valor médio da tensão de rotura do betão à compressão, em provetes cilíndricos
$f_{cm,cubo}$	valor médio da tensão de rotura do betão à compressão, em provetes cúbicos
$f_{ct}$	valor da tensão de rotura do betão à tração
$f_{ct,fl}$	valor da tensão de rotura do betão à tração por flexão
$f_{ctm}$	valor médio da tensão de rotura do betão à tração
$f_{ctm,fl}$	valor médio da tensão de rotura do betão à tração por flexão

---

$f_R$	valor da tensão residual de flexão do betão
$f_{Rm}$	valor médio da tensão residual de flexão do betão
$f_{su}$	valor da tensão de rotura do aço
$f_{sy}$	valor da tensão de cedência do aço
$f_{sy}$	valor da tensão de cedência do aço
$h$	altura da seção/viga
$h_R$	altura do provete de ensaio à tração por flexão
$l$	comprimento da viga
$l'$	distância entre apoios da viga
$l/d_f$	fator de forma das fibras
$l_f$	comprimento das fibras
$l_R$	distância entre apoios do provete de ensaio à tração por flexão
$x$	profundidade do eixo neutro
$x_{c,t}$	posição da força de tração nas fibras

## ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

ACI	American Concrete Institute
BRF	Betão Reforçado com Fibras
BRFA	Betão Reforçado com Fibras de Aço
CEB	Comité Euro-International du Béton
CEN	Comité Européen de Normalisation
CMOD	Crack Mouth Opening Displacement
CSH	Calcium Silicate Hydrate
EC2	Eurocódigo 2
EHE	Instrucción de Hormigón Estructural
FIB	Fédération Internationale du Béton
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte
HM	High Modulus
HPC	High Performance Concrete
HPPE	High Performance Polyethylene
ITZ	Interfacial Transition Zone
LM	Low Modulus
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MC10	Model Code 2010
MC90	Model Code 1990
PAN	Polyacrylonitrile
PCE	Polycarboxylate Ether
PE	Polyethylene
PP	Polypropylene

PVA	Polyvinyl acetate
QREN	Quadro de Referência Estratégica Nacional
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (systèmes de construction et ouvrages)
SEM	Scanning Electron Microscope

## Capítulo 1 – Introdução

Neste primeiro capítulo far-se-á um enquadramento do tema, uma descrição concisa e esclarecedora dos objetivos e da metodologia adotada, bem como a forma como está organizada a informação contida na presente dissertação.

### 1.1. Enquadramento do Tema

O nanobetão pode ser definido como o betão que incorpora nanopartículas. Essas nanopartículas, quando adicionadas isoladamente ao betão, numa percentagem ótima a rondar 1,25 %, conduzem a um aumento na resistência à compressão e a uma diminuição da permeabilidade, mas não só (Oltulu e Sahin, 2011). Nos últimos anos tem crescido o interesse pelo nanobetão e pelo estudo do efeito das nanopartículas, que podem viabilizar um “salto” tecnológico importante nos materiais de construção. A comprovar esta tendência está o facto de já existirem alguns trabalhos importantes nessa área, revelando o potencial das nanopartículas.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação está enquadrado num projeto de investigação mais amplo, designado “*Nanobetão nº 38702 - Desenvolvimento de um Betão de Desempenho Melhorado*”. Este projeto foi financiado pelo QREN, sistema de incentivo à investigação e desenvolvimento tecnológico, e teve a participação da empresa *Smart Inovation, Lda*, empresa especializada na investigação, produção e distribuição de materiais resultantes da inovação na área da nanotecnologia (Si, 2014). O consórcio formado entre a *Smart Inovation, Lda* e o *Instituto Superior de Engenharia de Coimbra* teve como objetivo realizar um projeto de investigação rigoroso e inovador sobre o efeito das nanopartículas no betão. Salienta-se ainda que o estudo experimental do projeto “*Nanobetão*” foi iniciado em Maio de 2014, com o apoio de duas bolsistas, Cátia Lourenço e Eliana Soldado, mestres em engenharia civil.

Esta dissertação pretende ser um complemento ao trabalho desenvolvido no âmbito do projeto de investigação mencionado. A dissertação do mestrando Rui Ismael, que estuda a aderência e a fendilhação de betões incorporando nanopartículas, foi também realizada em articulação e em complementaridade com o projeto “*Nanobetão*”. Assim, em conjunto com os orientadores e as investigadoras Lourenço e Soldado, decidiu-se analisar a resistência ao corte e à flexão de vigas de betão incorporando nanopartículas, como objeto desta dissertação.

O estudo no qual esta dissertação se insere é extensivo e crítico, podendo ser uma mais-valia para o desenvolvimento de novas abordagens de construção em Portugal e para o aumento do suporte científico. Outra razão que justifica o interesse e a pertinência desta dissertação é o facto de existir uma lacuna relativamente a ensaios estruturais de betões com nanopartículas e ao estudo da interação do nanobetão com fibras. Este trabalho procurará colmatar esta falha e assim contribuir para um aumento do conhecimento científico nessa área.

## **1.2. Objetivos e Metodologia**

Esta dissertação pretende ser pertinente, rigorosa e de fácil interpretação. Não obstante, o principal objetivo deste trabalho é o de estudar a influência das nanopartículas no comportamento mecânico de vigas em situação de corte e de flexão. Para a persecução desse objetivo destacam-se os seguintes passos:

- revisão bibliográfica sobre os assuntos em análise, nomeadamente: as propriedades dos betões incorporando nanopartículas e dos betões incorporando fibras metálicas; o comportamento de vigas sob o efeito do esforço de corte e de flexão;
- preparação do programa experimental, incluindo o estudo da conceção das vigas a ensaiar, para que durante os ensaios seja atingido o tipo de rotura previsto;
- fabrico das vigas a ensaiar e dos provetes para a caracterização das propriedades dos betões;
- caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados;
- realização dos ensaios experimentais nas vigas produzidas, possibilitando a observação do seu comportamento até à rotura, em situação de corte e flexão, e a recolha de dados para posterior análise;
- análise e discussão dos resultados obtidos durante os ensaios: análise da evolução dos principais parâmetros estudados; comparação dos resultados experimentais com as previsões definidas na principal regulamentação;
- apresentação das principais conclusões relativas aos ensaios e resultados obtidos e proposta de desenvolvimentos futuros.

## **1.3. Organização do Trabalho**

O presente trabalho encontra-se organizado em sete capítulos, cada um incluindo os diversos estádios do trabalho desenvolvido.

No Capítulo 1 elabora-se um pequeno enquadramento do tema em análise, realçando a importância e a pertinência do seu estudo. Define-se o objetivo principal da investigação e a metodologia adotada para o atingir. Por fim, é explicada a estrutura do presente documento, para que o mesmo seja de fácil interpretação.

No Capítulo 2 é efetuada uma pesquisa acerca dos betões (e até argamassas) incorporando nanopartículas. São, ainda, indicados alguns conceitos importantes, a forma como se chegou à ideia da incorporação de nanopartículas em materiais de construção e o processo de fabrico de nanopartículas. Elabora-se, também, uma síntese das principais propriedades das nanopartículas, mas também dos betões e das argamassas incorporando-as, baseada em diversos estudos recentes.

No Capítulo 3 apresenta-se um resumo da informação relativa às fibras utilizadas nos betões (mais concretamente, fibras metálicas) no qual está englobada a sua tipologia, o seu comportamento dentro do betão, os mecanismos de reforço por elas proporcionados e a sua aplicabilidade, quer em betões convencionais, quer em nanobetões.

No Capítulo 4 apresentam-se as principais características do comportamento de vigas de betão armado quando submetidas ao corte e à flexão, para vigas com e sem reforço com fibras de aço. Também se caracterizam as formas de rotura para ambos os fenómenos, a sua importância para a análise das vigas e os fatores que as podem influenciar. No fim, faz-se um breve resumo da regulamentação aplicável.

No Capítulo 5 expõe-se o programa experimental elaborado. É feita uma introdução onde se inclui a explicação da evolução do projeto de investigação, no qual se insere esta dissertação. São definidos os objetivos específicos do programa experimental, fazendo-se referência aos elementos a ensaiar. Incluem-se, ainda, a caracterização dos materiais e constituição das vigas de ensaio. É descrita a forma de produção das vigas, assim como o procedimento de ensaio a seguir, o qual abrange uma explicação sobre o funcionamento dos equipamentos de instrumentação e aquisição de dados utilizados.

No Capítulo 6 realiza-se a análise dos resultados obtidos. Este capítulo divide-se em duas partes: análise do comportamento ao corte e análise do comportamento à flexão. São apresentados diagramas, quadros e figuras que ajudam nesse estudo, que incluem: relação carga-deslocamento, valores teóricos, valores máximos experimentais e fendilhação/tipos de rotura.

No Capítulo 7, por fim, apresentam-se as principais conclusões decorrentes do estudo realizado, é feita uma reflexão global sobre os resultados obtidos e uma discussão sobre a concretização dos objetivos propostos. Apresentam-se ainda algumas sugestões para desenvolvimentos futuros relacionados com o tema do presente trabalho.





## Capítulo 2 – Betões Incorporando Nanopartículas

Neste capítulo abordar-se-á o tema das nanopartículas, aproximando-o o máximo possível ao fundamento desta dissertação, ou seja, restringindo a informação da nanotecnologia à aplicação em argamassas e, mais concretamente, aos betões. Far-se-á uma descrição das nanopartículas, a forma como são produzidas e as propriedades mais importantes a considerar.

### 2.1. Descrição

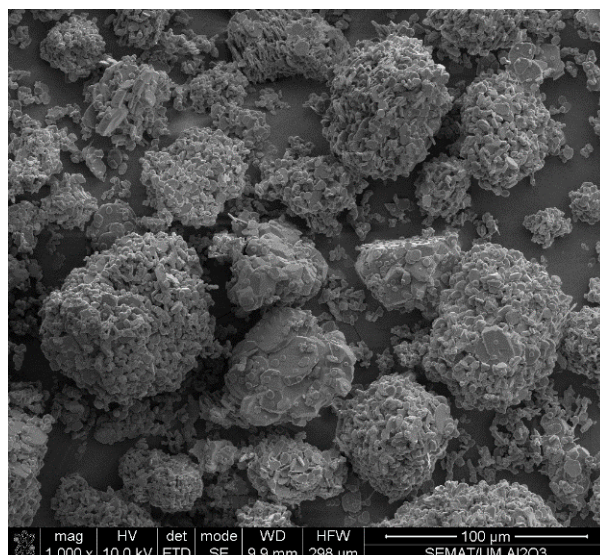
Quando se fala em nanobetão, ou betão incorporando nanopartículas, em geral está-se a referir a um betão pertencente à categoria de betões de elevado desempenho (HPC). Este tipo de betões, derivado de um incremento na tecnologia do betão, tem sido usado de uma forma bastante generalizada na engenharia civil. A constituição dos HPC comporta os elementos normais dos betões (cimento Portland, agregados e água) e ainda suplementos como adições (*e.g.* cinzas volantes ou microsilica) e adjuvantes (*e.g.* superplastificantes) (Zhang *et al.*, 2014).

Porém, com o progresso da nanotecnologia, é também possível obter um betão de elevado desempenho com a incorporação de nanopartículas. É pertinente esta substituição, já que existe uma crescente preocupação com a sustentabilidade e o impacto ambiental do fabrico do betão, que pode ser atendida pela utilização deste tipo de elementos, sendo que se espera reduzir um pouco o consumo do cimento Portland com a adição de nanopartículas.

A origem da nanotecnologia teve início com a célebre frase “*There is plenty of room at the bottom*” (“*Há muito espaço no fundo*”) (Feynman, 1960; Torgal e Jalali, 2011a), porém o termo “*nanotecnologia*” só foi definido um pouco mais tarde, em 1974, como o processamento de materiais, átomo por átomo ou molécula por molécula (Taniguchi, 1974; Torgal e Jalali, 2011a). Mais tarde, o relatório RILEM TC 197-NCM, torna-se o primeiro documento a descrever as potencialidades da nanotecnologia no ramo da edificação e dos materiais de construção (Zhu *et al.*, 2004; Torgal e Jalali, 2011a), nos quais a inclusão de nanopartículas é considerada como fundamental para a obtenção de um desempenho melhorado das argamassas e dos betões.

Na verdade, as nanopartículas são elementos de granulometria diminuta que apresentam diâmetros que podem variar entre os 0,1 e os 100 nm ( $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$ ) (Torgal e Jalali, 2011a), algo só possível observar através de um *Scanning Electron Microscope* (SEM) (Figura 2.1).

Interessa, obviamente, perceber qual a utilidade das nanopartículas nas argamassas e, principalmente, nos betões. Desde que começaram a ser produzidas, estas assumiram um elevado potencial na sua inclusão nesses elementos (Oltulu e Sahin, 2011). Embora ainda não exista uma vasta gama de estudos na área, uma ideia é genericamente aceite: a inclusão de nanopartículas em argamassas e betões aumenta notoriamente os valores de resistência (Oltulu e Sahin, 2011) e a durabilidade (Torgal e Jalali, 2011a).



**Figura 2.1 – Aspeto microscópico (SEM) de nanopartículas de alumina -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (*Smart Innovation, Lda*)**

Os nanomateriais mais utilizados na produção de argamassas e betões são:  $\text{SiO}_2$  (nanosílica - a mais utilizada),  $\text{TiO}_2$  (nanotitânio),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (nanoalumina),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (nanoferro) e  $\text{ZnO}$  (nanozinco) (Zhang *et al*, 2014; Heikal *et al*, 2013). Porém, resta saber se existem ainda outros tipos de nanopartículas que podem ser incluídos, se a dinâmica entre vários tipos de nanopartículas (ou até de nanopartículas com outros materiais como fillers, cinzas volantes, etc.) produz resultados úteis para utilização em misturas. Além do estudo da composição das argamassas e dos betões incorporando nanopartículas, interessa compreender os seus efeitos no desempenho mecânico (compressão, tração, etc.) e na durabilidade. Ou seja, podem ainda realizar-se muitos e variados estudos nesta área, confirmando a pertinência/interesse do tema.

## 2.2. Fabrico de Nanopartículas

Não existe muita informação sobre a forma como as nanopartículas (para incorporação em argamassas e betões) são fabricadas, não só por ser algo novo, mas por existir um certo secretismo relacionado com o patenteamento. Por isso, torna-se um pouco difícil tentar explanar sobre este assunto. No entanto, dentro do possível, podem-se fazer algumas considerações. Primeiro, há que entender que a nanotecnologia (ou a forma como se cria) considera dois tipos de abordagem (Birgisson *et al*, 2012):

- a abordagem “*top-down*” (“*cima-baixo*”) – em que estruturas maiores são reduzidas para uma escala na ordem dos nanómetros (mantendo no entanto as propriedades originais), ou seja, os materiais são desconstruídos em partes compósitas mais pequenas;
- e a abordagem “*bottom-up*” (“*baixo-cima*”) – em que os materiais são feitos a partir de átomos ou componentes moleculares.

No fundo, simplificando, a produção de nanopartículas pode ser obtida através de uma elevada energia de moagem ou através de uma síntese por processos químicos (Torgal, 2012).

É preciso ter cuidado com a forma como se produzem as nanopartículas, uma vez que existem diversas maneiras de as sintetizar, sendo que cada uma pode ter múltiplas tipologias como resultado, bastando para isso alterar os ingredientes e as técnicas de produção (Oliveira, 2012; Burda *et al*, 2005). Por isso, quando se faz um estudo como o da presente dissertação, em que se usam nanopartículas sintetizadas de uma forma muito específica, a da empresa *Smart Innovation, Lda*, não se podem generalizar as conclusões que forem obtidas.

Na verdade, a escolha do modo de utilização das nanopartículas não foi logo evidente: numa fase inicial do projeto de investigação utilizaram-se nanopartículas no estado líquido, mas depois foram alteradas (após alguns testes em laboratório), através de filtragem e secagem em estufa, para o estado amorfo.

### 2.3. Propriedades

É útil perceber qual a razão que leva à incorporação das nanopartículas em materiais como as argamassas e, especialmente, como os betões. Deve-se tentar compreender qual a justificação e as vantagens do uso das nanopartículas em comparação com outras adições amplamente utilizadas, como as adições pozolânicas, e que apresentam bons resultados na sustentabilidade e na ecoeficiência das misturas cimentícias (Torgal e Jalali, 2011b). Para tal, é pertinente uma análise das propriedades das nanopartículas e das propriedades das argamassas e dos betões resultantes dessa incorporação.

Em relação às propriedades das nanopartículas, existem vários parâmetros que se podem analisar:

**Dimensão** - em estudo laboratorial, as nanopartículas, para incorporação em argamassas e betões, tendem a ter tamanhos que variam entre os 10 a 30 nm (Ghafari *et al*, 2015; Heikal *et al*, 2013; Zhang *et al*, 2014). Salienta-se também que as nanopartículas possuem uma relação entre a superfície específica e o volume muito elevada (Figura 2.2) (Torgal, 2012; Sanchez e Sobolev, 2010). Desta forma, as nanopartículas preenchem os vazios entre as partículas do cimento, criando um efeito semelhante ao fíler, tornando a estrutura das misturas em que são introduzidas mais densa (Stefanidou e Papayianni, 2012; Ghafari *et al*, 2015).

**Dosagem** - existe já uma considerável bibliografia sobre a quantidade de nanopartículas que geram efeitos positivos quando incorporadas em argamassas e betões: Oltulu e Sahin (2011), Nazari *et al* (2010), Oliveira *et al* (2012), entre outros. As percentagens ótimas rondam os 0,5 a 2 %, notando-se que quantidades inferiores ou superiores, na generalidade dos casos, traduzem-se em perdas nas propriedades.

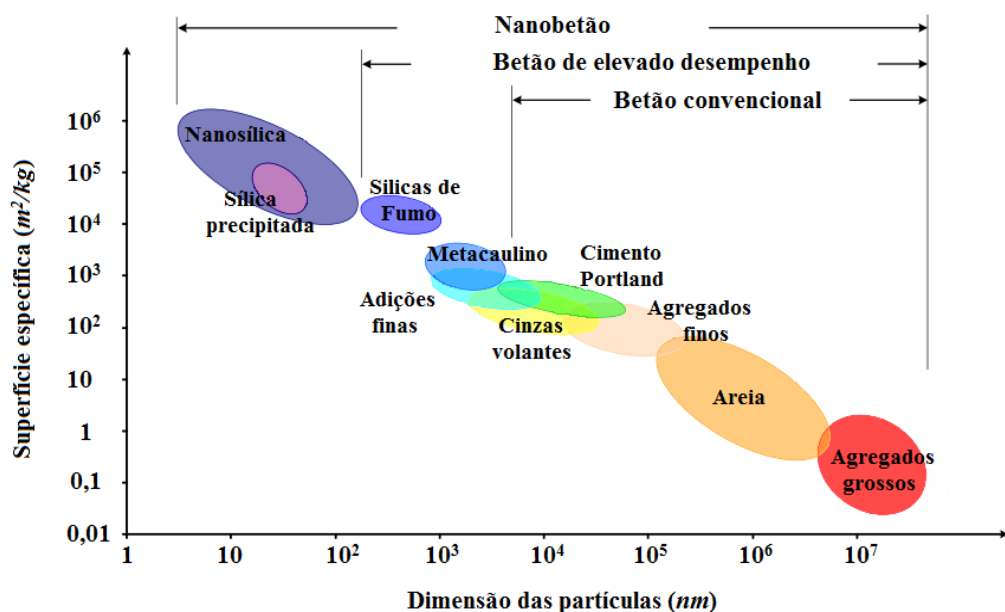


Figura 2.2 – Dimensão de partículas de materiais relacionados com o betão (adaptado de Sanchez e Sobolev, 2010)

**Dispersão** - um dos aspetos mais determinantes no uso das nanopartículas em misturas é a dificuldade em garantir uma dispersão eficaz. Tal afeta largamente a resistência mecânica, principalmente sob o efeito de cargas maiores. No processo de produção do betão pode facilmente ocorrer uma agregação das nanopartículas, dentro da matriz, anulando a vantagem do seu tamanho reduzido e criando potenciais zonas em que se gerarão concentrações de forças (Sanchez e Sobolev, 2010).

**Produção** - como já se referiu, os resultados experimentais dependem da forma de produção e da maneira como as nanopartículas são sintetizadas (Sanchez e Sobolev, 2010), por isso é preciso ter especial cuidado na comparação de resultados e cautela na generalização das conclusões obtidas.

**Toxicidade** - uma outra desvantagem, a par com a dificuldade de dispersão, é a potencial toxicidade das nanopartículas. Investigações comprovam que as nanopartículas podem causar inflamação dos pulmões (Grassian *et al*, 2007; Torgal e Jalali, 2011a) e outros problemas de saúde. Alguns autores (Dhawan *et al*, 2009; Torgal e Jalali, 2011a) acreditam que a inerente toxicidade das nanopartículas está relacionada com a dimensão, concentração e volume das mesmas. Nos ensaios realizados (Capítulo 5) existiu um especial cuidado no manuseamento das nanopartículas, recorrendo-se a proteções como batas, luvas e máscaras. Além destes problemas, existe ainda a possibilidade dos materiais com nanopartículas (*e.g.* nanobetão) no futuro, em estado de deterioração, poderem ser nocivos para o meio ambiente (Bystrzejewska-Piotrowska *et al*, 2009; Torgal e Jalali, 2011a).

Por outro lado, em relação à incorporação de nanopartículas em argamassas e betões, podem-se analisar os seguintes aspetos:

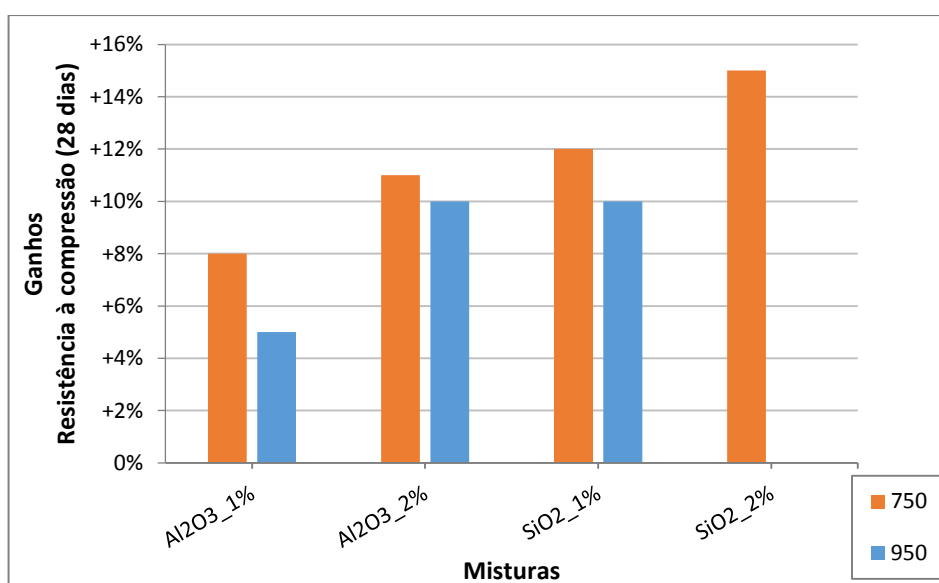
**Trabalhabilidade** - segundo trabalhos experimentais (Nazari, 2011a; Ghafari *et al*, 2015) a trabalhabilidade das misturas de betão é reduzida pela inclusão de nanopartículas, sendo necessária a adição de uma maior quantidade de água e/ou de superplastificante para contrariar esse efeito.

**Exsudação e segregação** - alguns autores (Collepari *et al*, 2002; Sobolev e Gutiérrez, 2005) indicam que a adição de nanosílica torna as misturas de betão mais coesas, reduz a exsudação e a segregação.

**Reatividade** - as nanopartículas favorecem a reação pozolânica, consumindo muito hidróxido de cálcio e formando silicato de cálcio hidratado (CSH) (Ghafari *et al*, 2015; Sobolev e Gutiérrez, 2005). Ou seja, as nanopartículas possuem uma elevada reatividade química, que pode ser um fator crucial para a sua utilização em detrimento de outras adições, como por exemplo, as cinzas volantes (Martins *et al*, 2014).

**Hidratação** - a adição de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ , por exemplo, permite uma aceleração no processo de hidratação do cimento (Qing *et al*, 2007), uma vez que estas atuam como centros de nucleação.

**Ligação pasta-agregado** - Ghafari *et al* (2015) e Qing *et al* (2007) concluíram que as forças de ligação entre a pasta e os agregados em misturas com nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  são superiores às forças nas misturas sem nanopartículas. A nanosílica melhora eficazmente a microestrutura da zona de ligação pasta-agregado, ou *Interfacial Transition Zone* (ITZ).



**Figura 2.3 – Ganhos da resistência à compressão de argamassas com nanopartículas (adaptado de Lourenço *et al*, 2015)**

**Resistência à compressão** - existem inúmeros estudos relativamente à forma como a resistência à compressão evolui aquando da adição de nanopartículas, e até de fibras, uma vez que esta é dos indicadores mais importantes para caracterizar as misturas. Do projeto de investigação onde esta dissertação se insere, refere-se o artigo de Lourenço *et al* (2015), no qual se conclui que a adição de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , em argamassas autocompactáveis, produz melhorias na resistência à compressão que pode chegar aos 15 %, em relação a misturas de referência. No gráfico da Figura 2.3 são demonstrados esses benefícios, comparando-se dois tipos de argamassas, diferenciados pelas dosagens de ligante ( $750 \text{ kg/dm}^3$  e  $950 \text{ kg/dm}^3$ ).

**Resistência à tração** - a resistência à tração, nos betões, está intrinsecamente relacionada com a resistência à compressão, sendo que quanto maior a resistência à compressão, maior será a resistência à tração (embora não exista linearidade nessa relação). Por isso, não é de estranhar que se existem estudos que revelam ganhos na resistência à compressão em misturas com nanopartículas, também existam estudos nos quais se depreendem ganhos na resistência à tração. Um desses estudos foi realizado por Nazari *et al* (2010) e revelou que argamassas com nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  demonstram ganhos na resistência à tração (quer nos ensaios por compressão diametral de cilindros, quer nos ensaios por flexão).

**Absorção de água (capilaridade e imersão)** - Jalal *et al* (2012) concluem que a incorporação de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  reduz a quantidade de água absorvida tanto por imersão como por capilaridade, traduzindo-se num contributo para a durabilidade dos nanobetões. Todavia, noutros estudos (Martins *et al*, 2014), em que se fez uso de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , houve um aumento da absorção de água com o aumento da percentagem daquelas nanopartículas. Por outras palavras, a tipologia das nanopartículas influencia significativamente os resultados, como já se tinha inferido.

**Permeabilidade** - a permeabilidade dos nanobetões também é satisfatória. Por exemplo, o estudo de Ji (2005) revela que a presença de nanosílica nos betões permite reduzir a passagem de água (e também de gás) de uma forma satisfatória.

**Retração** - ainda não são evidentes os efeitos que as nanopartículas têm na retração, porém, Sadrmomtazi *et al* (2009) alertam para o facto de ensaios com argamassas contendo nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  revelarem uma retração superior a argamassas comuns e até a argamassas com sílicas de fumo. O efeito é tanto negativo quanto maior for a percentagem de nanopartículas, segundo os mesmos autores. Tal fenómeno não é difícil de compreender se se tiver em conta que a hidratação é mais rápida, como já se mencionou.

**Ataque químico (sulfatos)** - o ataque de sulfatos conduz a uma expansão e fendilhação da pasta de cimento endurecido e, eventualmente, produz uma perda de resistência. Com a incorporação de nanosílica, Moslemi *et al* (2014) provaram que a expansão, aquando da introdução de sulfatos em provetes de argamassa, é menor que em argamassas de referência,

ou seja, a resistência ao ataque químico é superior. Também Martins *et al* (2014) concluem que o uso de 1 % nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  se traduz em ganhos nessa resistência.

**Difusão de cloretos** - Jalal *et al* (2012) divulgam que a percentagem de penetração de cloretos é influenciada, reduzindo, pela adição de nanopartículas de sílica na mistura (betão autocompactável). Tal prende-se com o facto de a nanosílica tornar, como já se referiu, as misturas mais compactas. Na Figura 2.4 mostra-se a evolução da percentagem de cloretos obtida por Jalal *et al* (2012) em função da profundidade do provete, para uma mistura de referência e para uma mistura com 2 % de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  ( $400 \text{ kg/m}^3$  de cimento).

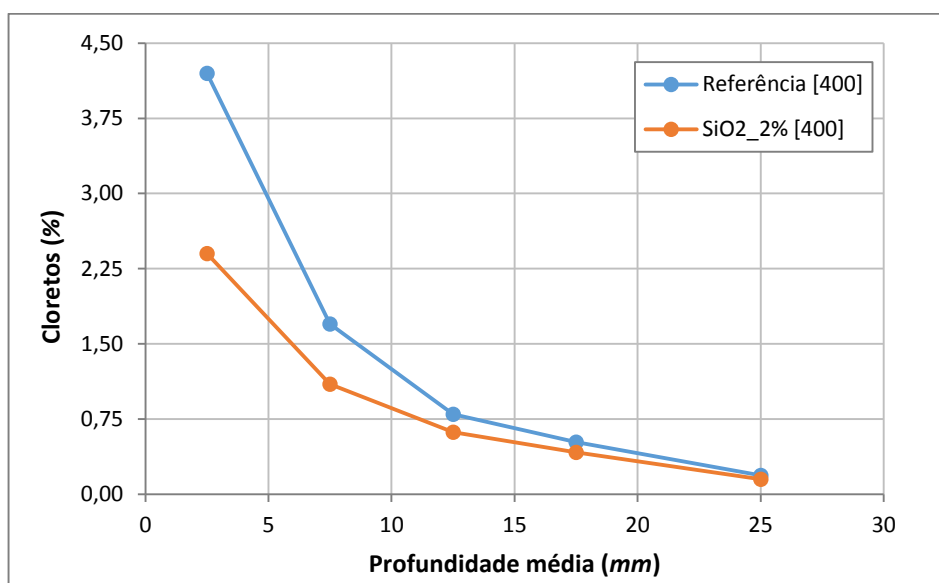


Figura 2.4 – Penetração de cloretos em mistura com  $\text{SiO}_2$  (adaptado de Jalal *et al*, 2012)

**Resistência à abrasão** - esta resistência está ligada com a característica homogénea e compacta dos nanobetões e, como tal, não é de admirar que a inclusão de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ , e até  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , produza efeitos positivos: quanto maior a percentagem de nanopartículas, menor o desgaste, sendo que o uso de nanosílica gera melhores resultados do que o uso de nanoalumina (Nazari e Riahi, 2011b).

**Resistividade elétrica** – segundo Jalal *et al* (2012), a resistividade elétrica aumenta com a presença de nanosílica em misturas de betão autocompactável. Ou seja, com a presença de nanopartículas, reduz-se a passagem de corrente elétrica nos betões, o que pode ser crucial para evitar a corrosão das armaduras.





## Capítulo 3 – Betões Incorporando Fibras Metálicas

Neste capítulo abordar-se-ão as fibras a adicionar aos betões, mencionando o tipo de fibras existentes, particularmente as fibras metálicas (que serão usadas no programa experimental – Capítulo 5), o seu efeito no comportamento dos betões e as suas aplicações.

### 3.1. Descrição

As fibras não são um material novo, o início da sua utilização remonta à civilização egípcia, com o uso das mesmas como reforço de materiais frágeis (*e.g.* palha, barro) (Ferreira, 2008; Gomes, 2013). Porém, é a inclusão de fibras na mistura dos betões que realmente estabelece um marco importante na construção civil (as fibras conseguem alargar a versatilidade dos betões e permitem uma simplificação do processo de construção) sendo que as primeiras patentes de betões reforçados com fibras (BRF) datam de 1874 (Löfgren, 2005). Assim, é fácil perceber a afirmação inicial de que as fibras não são materiais recentes e que, embora já existam inúmeros estudos, há ainda aspetos a esclarecer, como por exemplo, a interação com novos tipos de betões (como é o caso dos nanobetões).

### 3.2. Tipos de Fibras

Existem vários tipos de fibras, quanto ao material, que podem ser utilizadas, desde fibras de aço até fibras de Wollastonita, como mostram os Quadros 3.1 e 3.2.

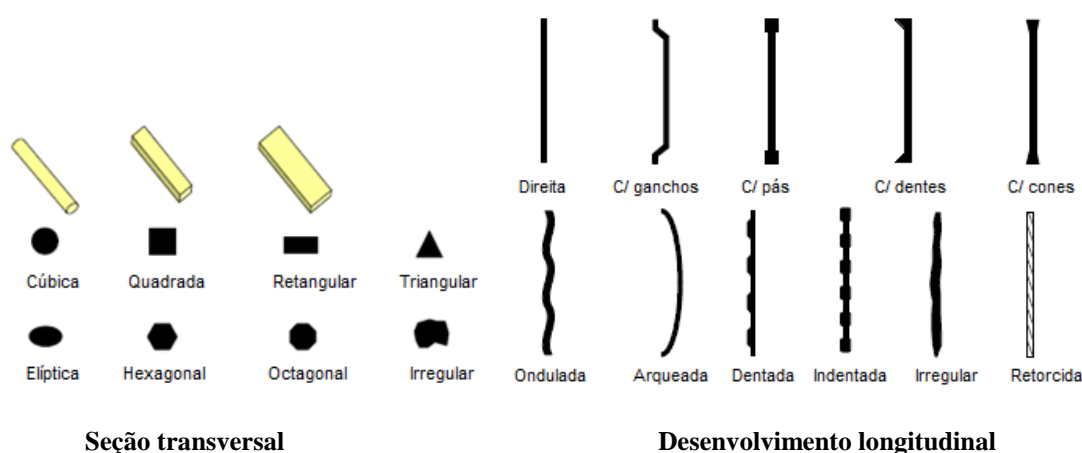
**Quadro 3.1 – Propriedades físicas de algumas fibras (1) (adaptado de Löfgren, 2005)**

Tipo de fibra	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Massa Volúmica ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	Resistência à Tração ( $\text{MPa}$ )	Módulo de Elasticidade ( $\text{GPa}$ )	Extensão Última (%)
<b>Metálica</b>					
Aço	5 - 1000	7,85	200 – 2600	195 – 250	0,50 – 5
<b>Vidro</b>					
Vidro E	8 – 15	2,54	2000 - 4000	72	3,00 – 4,80
Vidro AR	8 – 20	2,70	1500 – 3700	80	2,50 – 3,60
<b>Natural - Orgânico</b>					
Madeira	15 – 125	1,50	300 – 2000	10 – 50	20
Coco	100 - 400	1,12 – 1,15	120 – 200	19 – 25	10 – 25
Bambu	50 – 400	1,50	200 – 440	33 – 40	-
Juta	100 - 200	1,02 – 1,04	250 – 350	25 – 32	1,50 – 1,90
<b>Natural - Inorgânico</b>					
Amianto	0,03 -25	2,55	200 – 1800	164	2 - 3
Wollastonita	25 - 40	2,87 – 3,09	2700 - 4100	303 - 530	---

**Quadro 3.2 – Propriedades físicas de algumas fibras (2) (adaptado de Löfgren, 2005)**

Tipo de fibra	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Massa Volúmica ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	Resistência à Tração ( $\text{MPa}$ )	Módulo de Elasticidade ( $\text{GPa}$ )	Extensão Última (%)
<b>Sintética</b>					
Acrílico (PAN)	5 – 17	1,18	200 – 1000	14,60 – 19,60	7,50 – 50
Aramida	10 – 12	1,40 – 1,50	2000 – 3500	62 – 130	2 – 4,60
Carbono (LM)	7 – 18	1,60 – 1,70	800 – 1100	38 – 43	2,10 – 2,50
Carbono (HM)	7 – 18	1,70 – 1,90	1500 – 4000	200 – 800	1,30 – 1,80
Nylon	20 - 25	1,16	965	5,17	20
Poliéster	10 - 8	1,34 – 1,39	280 – 1200	10 – 18	10 – 50
Polietileno (PE)	25 - 1000	0,96	80 – 600	5	12 – 100
Polietileno (HPPE)	---	0,97	4100 – 3000	80 – 150	2,90 – 4,10
Polipropileno (PP)	10 – 200	0,90 – 0,91	310 – 760	3,50 – 4,90	6 – 15
Acet. de Polivinil (PVA)	3 - 8	1,20 – 2,50	800 – 3600	20 – 80	4 – 12

As fibras podem ainda ser classificadas, no geral, tendo em conta a geometria, dependente da sua seção transversal e do seu desenvolvimento longitudinal (Figura 3.1).

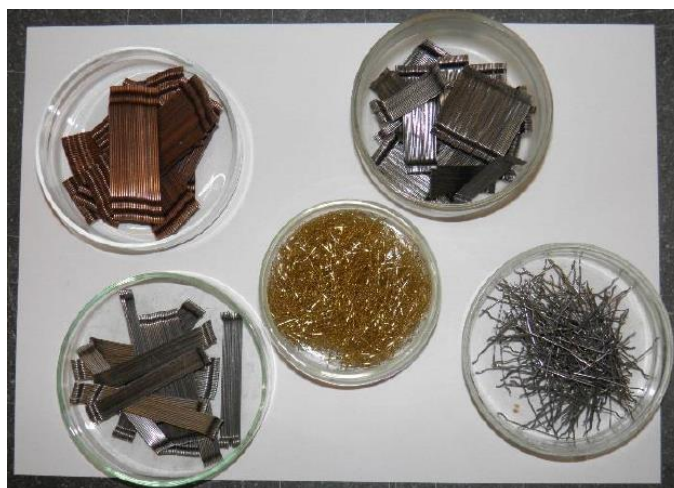
**Figura 3.1 – Exemplos de geometrias típicas de fibras (adaptado de Löfgren, 2005)**

### 3.2.1 Fibras Metálicas

De entre todos os tipos de fibras, as metálicas (Figura 3.2) são as mais populares e as mais usadas, quer em laboratório quer na construção civil (Vitt, 2011; Sousa, 2014). Por causa do efeito positivo das fibras metálicas nas propriedades mecânicas e, em alguns casos, na durabilidade (por controlo da fendilhação) dos betões (Zhang *et al*, 2014) estas têm sido implementadas com elevado sucesso em vários tipos de estruturas.

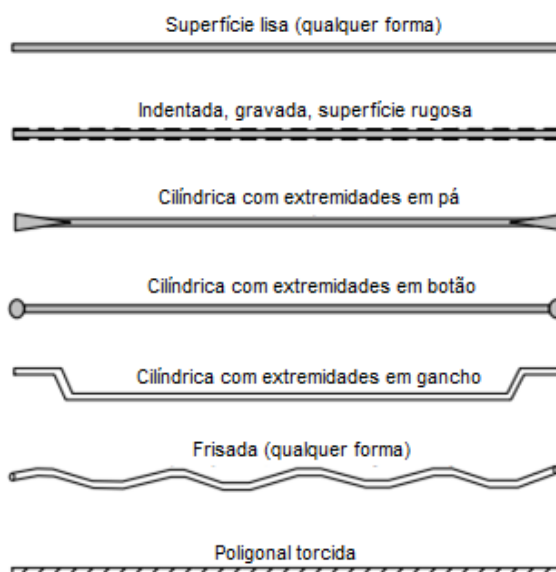
As fibras de aço são fibras metálicas do qual se faz um uso mais significativo relativamente a outros tipos de fibras (*e.g.* fibras de vidro, sintéticas, etc.). Recorrer a quantidades

volumétricas ponderadas de fibras de aço diminui as tensões de tração aplicadas no betão (são criados caminhos alternativos para resistir às tensões de tração) e consequentemente a uma diminuição da fendilhação (Vitt, 2011). Este tipo de fibras é altamente útil em situações em que não se consegue fazer uma distribuição das armaduras em toda a área de tração. No Subcapítulo 3.3, e também no Capítulo 4, elucidar-se-á melhor as vantagens da utilização de fibras.



**Figura 3.2 – Exemplos de tipos de fibras metálicas (Sousa, 2014)**

Para ilustrar a enorme variedade de tipos de fibras de aço existentes no mercado, apresenta-se, ainda, a Figura 3.3.



**Figura 3.3 – Tipos de fibras de aço existentes, relativamente à sua geometria (adaptado de Naaman, 2003)**

Se se contar com as três principais variáveis de caracterização das fibras - material, propriedades químicas/físicas e propriedades mecânicas (Naaman, 2003) – verifica-se a existência de um número infundável de combinações para a escolha das fibras a utilizar.

### **3.3. Comportamento das Fibras de Aço no Betão**

É importante perceber como as fibras metálicas (aço) interagem com o betão por forma a ser justificada a sua utilização em elementos estruturais, como as vigas.

#### **3.3.1. Estrutura da Matriz**

Em teoria, qualquer tipo de betão, seja ele plástico ou fluído, de baixa ou alta resistência, é passível de ser reforçado com fibras, desde que determinados princípios tecnológicos básicos sejam atingidos (Figueiredo, 2011).

Falando na matriz de betões reforçados com fibras, deve-se ter em conta que a pasta de cimento não é muito da dos outros tipos de betão (Ferreira, 2008; Bentur e Mindess, 2006; Löfgren, 2005; Gomes, 2013). Porém, acontece que a introdução de fibras no betão induz uma perturbação na forma como os agregados se encontram distribuídos, verificando-se uma maior concentração de pasta de cimento em redor das fibras, resultado do preenchimento dos espaços criados (Ferreira, 2008; Dupont, 2003).

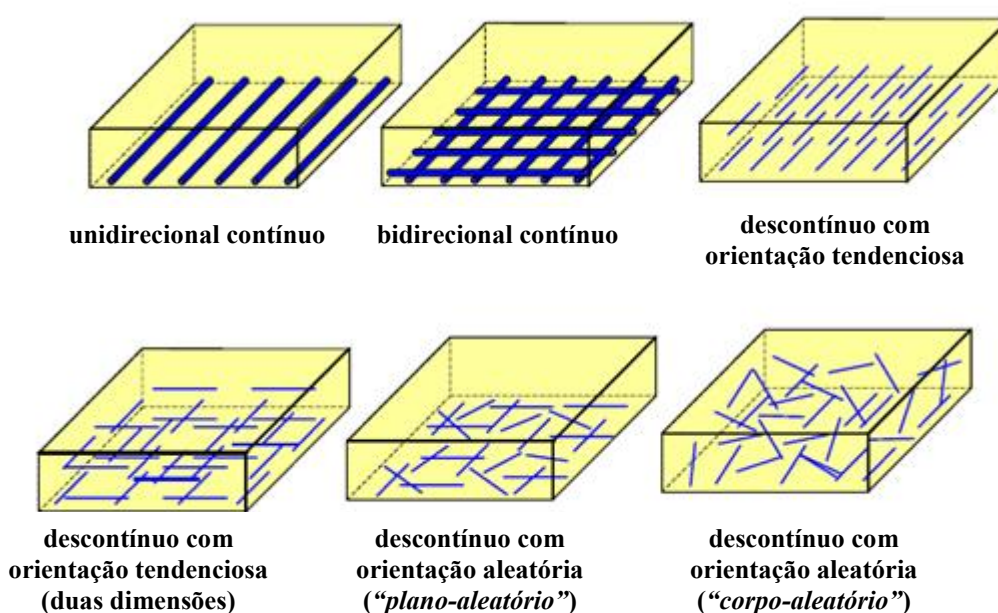
A adição de fibras torna o betão mais heterogéneo e provoca uma alteração do comportamento, passando, tendencialmente, de frágil para dúctil. As fibras de aço têm potencial para conferir aos betões maior capacidade de deformação e maior resistência à tração, à fadiga, ao impacto e à fendilhação (Imam *et al*, 1997).

#### **3.3.2. Orientação, Distribuição e Volume de Fibras**

Antes de se falar na orientação e na distribuição das fibras metálicas no betão, é importante referir sucintamente as suas formas de entrega, ou aplicação, durante a betonagem (Vitt, 2011):

- Fibras soltas;
- Fibras coladas;
- Fibras coladas em rolo (*Dramix<sup>®</sup> Booster*);
- Fibras zincadas.

A orientação das fibras tem um papel extremamente importante no desempenho mecânico de elementos reforçados com estas. Existem essencialmente duas formas de orientação: orientação dirigida e orientação aleatória (Figura 3.4). Na primeira, utilizam-se filamentos longos ou métodos de produção especiais (*e.g.* pré-colocação das fibras), na segunda utilizam-se fibras curtas e a distribuição é aleatória e ilimitada no betão, sendo que pode ser variável em três dimensões (“*corpo-aleatório*”) ou apenas em duas (“*plano-aleatório*”) (Löfgren, 2005).



**Figura 3.4 – Representação esquemática de vários tipos de compósitos com fibras (adaptado de Löfgren, 2005)**

A distribuição das fibras não é linear - existem muitos fatores que podem intervir nesse processo, como por exemplo: o método de colocação, o equipamento utilizado na bombagem do betão, as propriedades do betão no estado fresco e até as superfícies do betão e o confinamento (Löfgren, 2005).

O objetivo de uma orientação e de uma distribuição adequadas das fibras dentro do betão é o de garantir o atravessamento de fendas, que se irão formar quando os elementos estiverem sujeitos a esforços. A principal consequência da incorporação das fibras é a restrição da propagação/abertura das fendas formadas, sendo que tal se costuma denominar por “*eficiência das fibras*” (Löfgren, 2005).

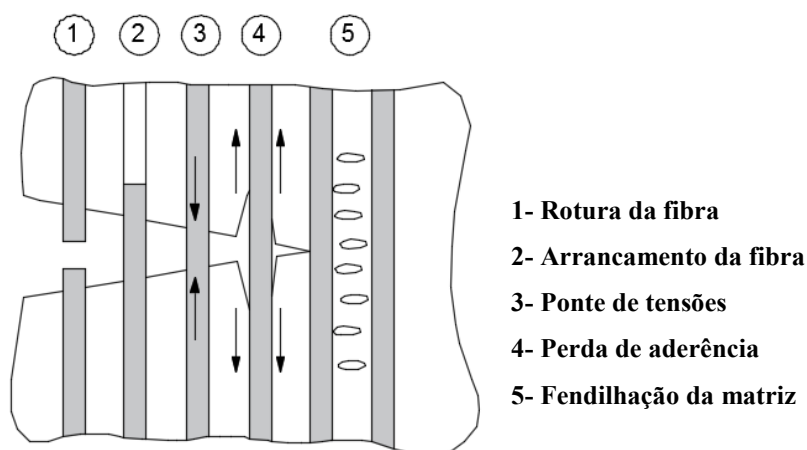
O volume de fibras a utilizar é também um aspeto importante a ter em consideração: quanto maior for o teor de fibras, mais fibras atuarão como pontes de transferência de tensões ao longo das fendas (Figueiredo, 2011). Como tal, o volume de fibras é o principal parâmetro

para caracterizar o comportamento de elementos reforçados com fibras. É comum definirem-se volumes mínimos para cada tipo de fibras, uma vez que, evidentemente, o seu efeito só se torna positivo/considerável a partir de uma certa quantidade. Esse volume está relacionado com o conceito “*volume crítico*”, que corresponde ao volume de fibras para o qual compósito mantém a mesma capacidade resistente após a rotura da matriz (Barros, 2009). Por outro lado, também existem limites à quantidade máxima de fibras, que se prendem um pouco com a trabalhabilidade. Geralmente, o teor de fibras de aço não ultrapassa os 2 % - 3 % (Naaman, 2003; Gomes, 2013).

### 3.3.3. Mecanismos de Reforço

O comportamento após a fendilhação de elementos reforçados com fibras está relacionado com os processos de interação entre fibra e matriz (Figura 3.5), que são (Zollo, 1997; Ferreira, 2008; Löfgren, 2005; Gomes, 2013):

- rotura das fibras (“*fibre failure*”);
- arrancamento das fibras ou deslizamento (“*fibre pullout*”);
- ponte de transferência de tensões conferida pelas fibras (“*fibre bridging*”);
- perda de aderência das fibras (“*fibre debonding*”);
- fendilhação da matriz entre fibras (“*matrix cracking*”).



**Figura 3.5 – Mecanismos de absorção de energia em BRF (adaptado de Zollo, 1997 e Ferreira, 2008)**

Faça-se agora uma comparação entre um elemento sem reforço e um elemento reforçado com fibras de aço (Barros, 2009):

- no primeiro caso, se existir fendilhação, as tensões procurarão outro percurso para se propagarem, que acaba por ser a extremidade da fenda (Figura 3.6 – *Betão sem fibras*). Origina-se, assim, uma concentração de tensões e, se for ultrapassada a resistência do betão, dá-se uma rotura frágil;
- no segundo caso, se existir fendilhação, as tensões têm um caminho que é proporcionado pelas já referidas pontes que as fibras estabelecem (Figura 3.6 – *Betão com fibras*). Ou seja, já não existirá uma concentração tão forte de tensões na extremidade da fenda, o que se traduz numa propagação mais lenta das fendas e um comportamento próximo do dúctil.

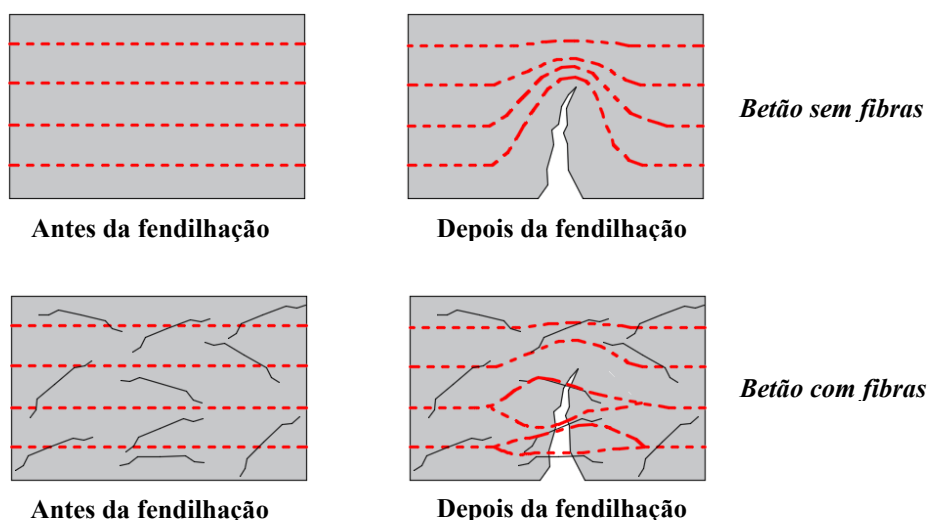


Figura 3.6 – Esquemas de concentração de tensões (adaptado de Barros, 2009)

### 3.4. Fibras de Aço em Nanobetões

Tendo presente que este trabalho foca-se no estudo dos betões incorporando nanopartículas (*i.e.* nanobetões), é conveniente, e interessante, uma análise da sua interação com componentes como as fibras metálicas.

Uma vez que não existe grande desenvolvimento no estudo da influência das fibras metálicas em nanobetões, é pertinente incluí-lo nesta dissertação. Como se elucidará mais à frente, este estudo não se limitou meramente ao comportamento do material, baseado em ensaios resistentes (*i.e.* ensaios de compressão, tração por compressão diametral, etc.). Realizaram-se, também, ensaios em elementos estruturais (vigas), conferindo um carácter único e promissor a este trabalho e ao projeto de investigação “*Nanobetão*”.

Tendo em conta os subcapítulos anteriores (do 3.1 ao 3.3), facilmente se depreende que o primeiro passo a dar numa formulação de nanobetões que incluam fibras é o de definir, essencialmente, o tipo de fibras e o volume de fibras a utilizar. Bibliografia analisada, embora

pouco extensa, deu algumas indicações sobre o caminho a seguir. No caso do presente trabalho, a justificação da escolha do tipo e volume de fibras encontra-se discriminada no Capítulo 5.

### 3.5. Aplicações de Betões com Fibras de Aço

Para terminar o capítulo, alude-se ao facto de os betões reforçados com fibras de aço (BRFA) apresentarem inúmeras aplicações, que abrangem várias áreas do ramo da engenharia civil. Assim, no Quadro 3.3 apresentam-se essas aplicações (gerais), bem como os atributos referentes a cada uma.

**Quadro 3.3 – Aplicações do BRFA (adaptado de Barros, 1996 e Gomes, 2013)**

<b>Área de aplicação</b>	<b>Atributos</b>
<b>Pavimentos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento da resistência às ações de fadiga e impacto;</li> <li>- Aumento da resistência à tração em flexão, permitindo diminuir a espessura dos pavimentos ou aumentar a sua vida útil;</li> <li>- Diminuição do número de juntas devido a uma maior resistência à tração, a uma maior capacidade de absorção de energia e a um melhor controlo da fendilhação.</li> </ul>
<b>Estruturas hidráulicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior resistência à cavitação, erosão e impacto.</li> </ul>
<b>Estruturas de betão projetado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Economia de mão-de-obra e de material;</li> <li>- Menor tempo de execução;</li> <li>- Execução de peças de geometria complexa;</li> <li>- Aumento da qualidade do reforço.</li> </ul>
<b>Estruturas de betão refratário</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior resistência às tensões de origem térmica, ao choque térmico e às ações térmicas cíclicas.</li> </ul>
<b>Elementos pré-fabricados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilidade de colocação em obra e de substituição;</li> <li>- Qualidade de acabamento;</li> <li>- Boas propriedades mecânicas;</li> <li>- Economia.</li> </ul>
<b>Componentes estruturais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminuição do congestionamento de armaduras convencionais;</li> <li>- Decréscimo do espaçamento e abertura de fendas;</li> <li>- Aumento da ductilidade do modo de rotura;</li> <li>- Maior resistência às ações cíclicas e de impacto.</li> </ul>
<b>Reparação e reforço de estruturas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Economia de tempo, de mão-de-obra e de material.</li> </ul>



## Capítulo 4 – Resistência ao Corte e Resistência à Flexão

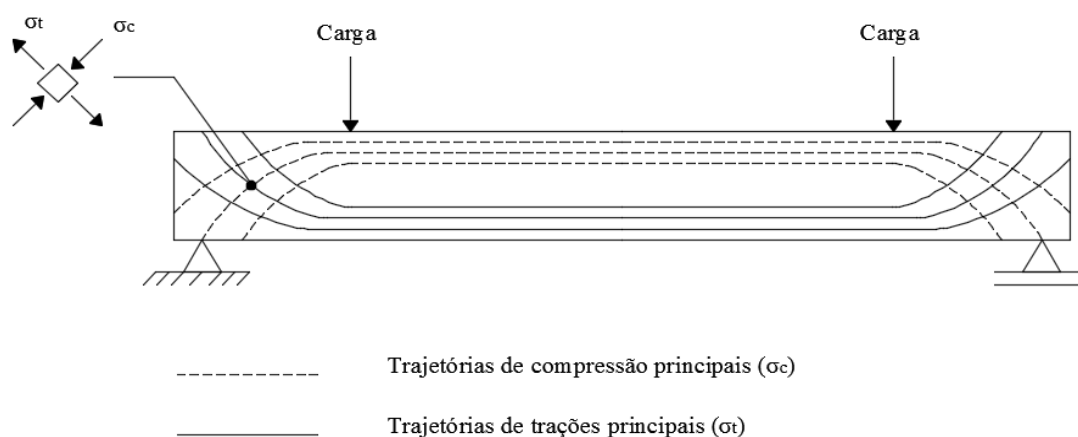
Neste capítulo apresentar-se-ão as principais características do comportamento de vigas de betão armado simples, mas também de vigas de BRFA, quando submetidas ao esforço transversal (corte) e à flexão. Mostrar-se-á, ainda, quais as formas de rotura por esforço transversal e flexão, bem como os mecanismos de resistência associados. No fim abordar-se-á um pouco, do ponto de vista qualitativo, a regulamentação aplicável ao presente estudo, que será importante para a análise dos resultados (Capítulo 6), onde se fará uma descrição mais detalhada dos procedimentos de cálculo.

### 4.1. Corte

#### 4.1.1. O Fenómeno do Esforço Transverso - Caso Geral

Não é fácil definir um conceito como o esforço transversal, mas uma boa tentativa de o fazer indicará que este corresponde à projeção de todas as forças, à esquerda ou à direita de uma seção, segundo a direção perpendicular ao eixo da barra/elemento, sendo que age no sentido de cortar a seção (tendência). Daí o esforço transversal ser também denominado por esforço de corte. O esforço transversal é, em suma, igual à resultante das tensões tangenciais, segundo os princípios gerais da mecânica estrutural.

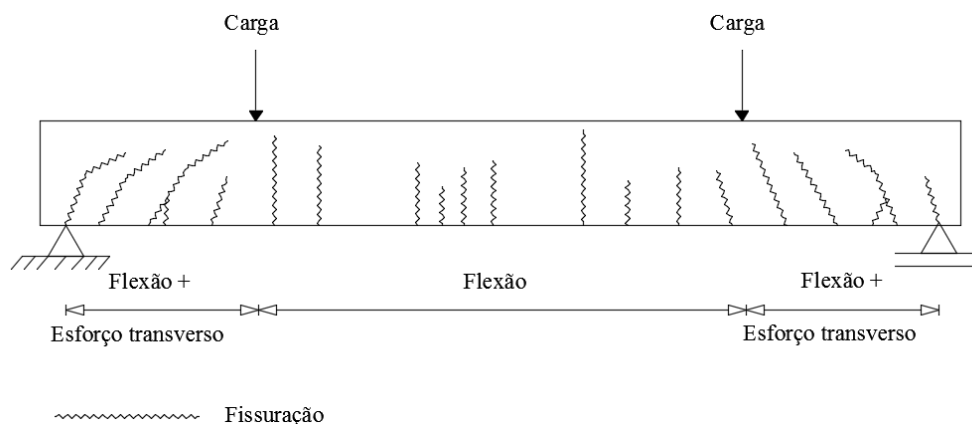
Tendo como válida a hipótese de comportamento linear elástico dos materiais, uma viga submetida a duas cargas concentradas apresenta trajetórias principais de tensão (compressão e tração), conforme a Figura 4.1.



**Figura 4.1 - Trajetória de tensões de uma viga em estado não fendilhado (adaptado de Câmara, 2014)**

No denominado “Estado I” (ou “Estado não fendilhado”), verifica-se que as trajetórias são paralelas ao eixo longitudinal, no trecho de flexão pura (zona central). À medida que a carga

aumenta, ocorre a fendilhação do betão na direção perpendicular às tensões de tração, sendo que nas zonas laterais surgem fendas de flexão e de corte (Figura 4.2) (Câmara, 2014).



**Figura 4.2 - Fendilhação de uma viga (adaptado de Câmara, 2014)**

O aparecimento da fendilhação no betão identifica o início do “*Estado II*” (ou “*Estado fendilhado*”). O aumento da carga faz, ainda, com que a fendilhação se prolongue até uma zona próxima da região comprimida. Verifica-se que as fendas “*cortam*” a possibilidade de encaminhamento das trações inclinadas, de acordo com o comportamento elástico. Em tais condições, a inclusão de armadura transversal (*i.e.* estribos) fará com que as cargas aplicadas transmitidas à parte inferior da peça, devido às tensões de compressão no betão, sejam retransmitidas para a parte superior, repetindo-se esse mecanismo até que as cargas se encaminhem até aos apoios (Câmara, 2014; Leonhardt e Mönnig, 1977).

Ora, acontece que este mecanismo é semelhante a uma treliça, pelo que surge então um modelo de cálculo conhecido como “*Modelo de Escoras e Tirantes*”, em que as resultantes das tensões de compressão no betão correspondem às escoras (ou bielas) e os estribos, por se encontrarem tracionados, comportam-se como tirantes (Lúcio, 2006).

Este modelo deriva de uma simplificação feita a partir da análise da distribuição de forças no betão realizada por Ritter e Mörsch (*“Modelo Clássico de Treliça”*) e baseia-se nos três pressupostos seguintes: banzos paralelos, diagonais comprimidas com inclinação de  $45^\circ$  e diagonais de tração com inclinação  $\alpha$  em relação à horizontal (Barros, 2009; Gomes, 2013). Todavia, regulamentação atual como o *“Eurocódigo 2 - Projecto de Estruturas de Betão”* (EC2) admite valores inferiores do ângulo das diagonais (escoras) comprimidas até  $21,8^\circ$ .

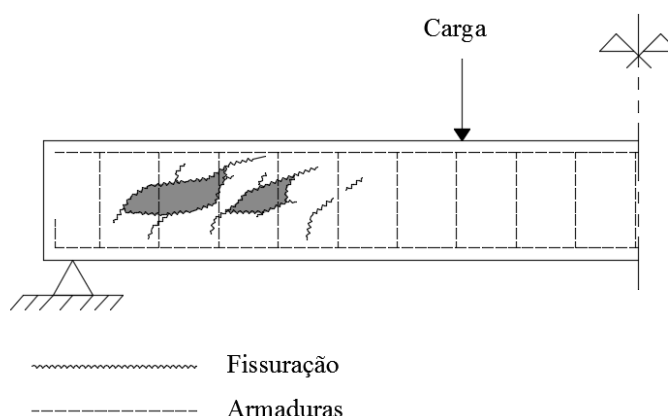
#### 4.1.2. Rotura por Esforço Transverso em Vigas

Neste ponto proceder-se-á à descrição dos tipos de rotura, mais importantes, que podem ocorrer em vigas, em resultado da ação do esforço transversal. Esta análise é importante para a

preparação dos ensaios experimentais. Os tipos de rotura apresentados são adaptados de Barros (2009) e de Câmara (2014), tendo por base a organização em Gomes (2013).

#### 4.1.2.1. Rotura por Esmagamento da Biela de Compressão

Este primeiro tipo de rotura ocorre geralmente em elementos de dimensões reduzidas relativamente às cargas atuantes, uma vez que, nessa situação, se atingem valores excessivos das tensões principais de compressão. Tal provoca um esmagamento (ou rotura frágil) das bielas/diagonais comprimidas que se desenvolvem entre as fendas de corte (Figura 4.3), sem que haja cedência da armadura transversal. Ou seja, ocorre uma rotura por esgotamento da resistência do campo comprimido de tensões (Barros, 2009; Câmara, 2014).

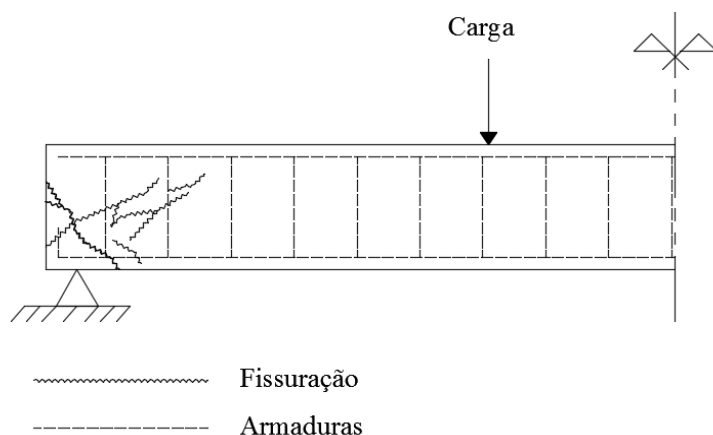


**Figura 4.3 – Rotura por esmagamento da biela de compressão (adaptado de Barros, 2009)**

#### 4.1.2.2. Rotura por Falha de Ancoragem no Apoio

Na seção sobre o apoio, há uma elevada sollicitação da armadura longitudinal, devido ao efeito de arco (*i.e.* encaminhamento direto das cargas para o apoio), que pode conduzir a uma falha de ancoragem da mesma, originando consequentemente uma rotura junto à região de encontro da diagonal de compressão com o banzo tracionado. Caso tal ocorra, facilmente se verifica uma propagação das fendas até à alma (Figura 4.4), que acaba por ceder sob o efeito do esforço de corte (Barros, 2009; Câmara, 2014).

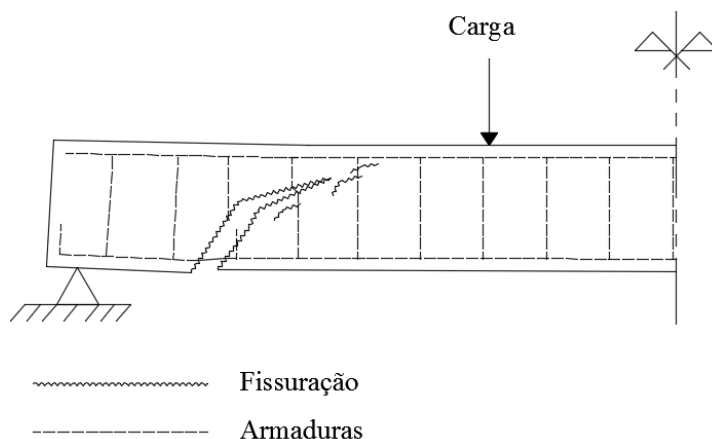
Geralmente, este tipo de rotura ocorre devido a um comprimento ou forma de amarração insuficientes (Câmara, 2014).



**Figura 4.4 – Rotura por falha de ancoragem no apoio (adaptado de Barros, 2009)**

#### 4.1.2.3. Rotura por Falha da Armadura Transversal

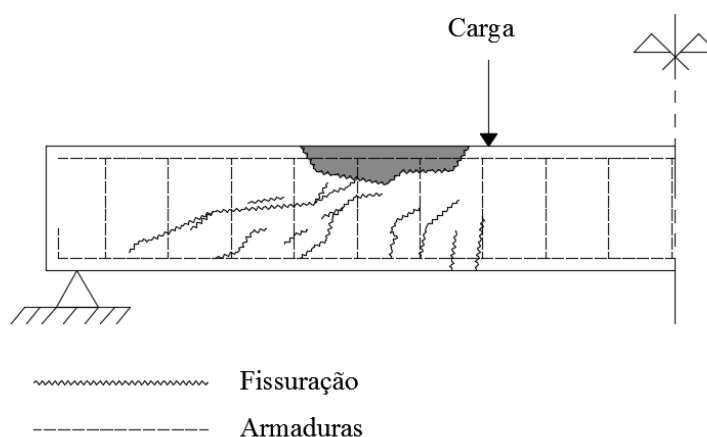
A rotura do campo de tensões vertical, ou da armadura transversal (*i.e.* estribos), ocorre quando se atinge a tensão de cedência dos estribos, ou seja, quando a capacidade resistente à tração destes se torna insuficiente para efetuar a transmissão de cargas do banzo inferior para o banzo superior da viga. Nesta situação, ocorre uma maior abertura das fendas de corte e dá-se uma propagação das fendas até à região comprimida, levando, eventualmente, a um rompimento da armadura transversal (Figura 4.5) (Barros, 2009; Câmara, 2014).



**Figura 4.5 – Rotura por falha da armadura transversal (adaptado de Barros, 2009)**

#### 4.1.2.4. Rotura por Compressão do Bordo Superior

A Figura 4.6 apresenta o esmagamento do bordo superior de uma viga decorrente de uma sobrecarga no betão, consequência de uma redução da região comprimida da alma da viga.



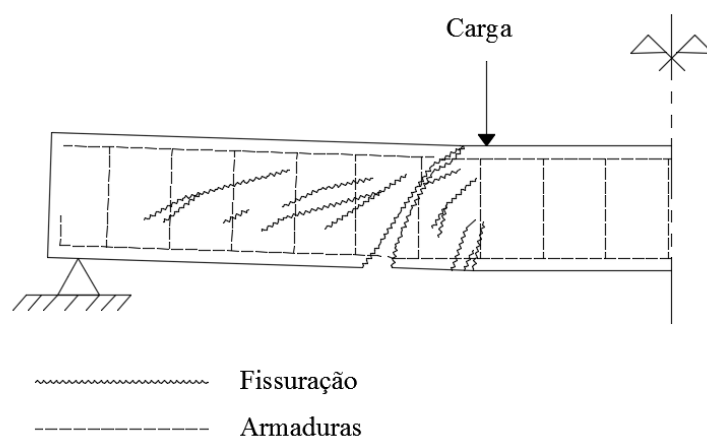
**Figura 4.6 – Rotura por compressão do bordo superior (adaptado de Barros, 2009)**

Numa situação de insuficiente armadura transversal, aquando o limite de tensão de cedência, surgem muitas fendas inclinadas (segundo as trajetórias das tensões principais) que elevam a posição da linha neutra. Nestas circunstâncias, pode verificar-se uma rotura brusca/frágil do betão (Barros, 2009; Câmara, 2014).

#### 4.1.2.5. Rotura por Falha da Armadura Longitudinal

O último tipo de rotura pode, geralmente, ocorrer devido a deficiências na armadura transversal (*e.g.* espaçamento e/ou ancoragem incorreta dos estribos) (Câmara, 2014).

Se existir uma deformação exagerada da armadura transversal, as fendas daí resultantes descolocam-se e aumentam a sua abertura, podendo originar uma flexão localizada na armadura longitudinal, e sua eventual rotura (Figura 4.7). Estas fendas podem desenvolver-se até ao limite do bordo superior da viga (Barros, 2009; Câmara, 2014).



**Figura 4.7 – Rotura por falha da armadura longitudinal (adaptado de Barros, 2009)**

### 4.1.3. Resistência ao Esforço Transverso em Vigas

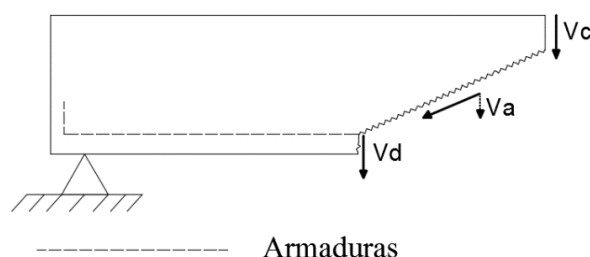
Este subcapítulo segue uma organização com base em Gomes (2013), sendo os mecanismos apresentados, no entanto, adaptados de Nilson *et al* (2010), Lúcio (2006) e Vitt (2011).

#### 4.1.3.1. Vigas Sem Reforço ao Esforço Transverso

Nilson *et al* (2010) referem que nas vigas sem reforço ao esforço transverso (*i.e.* estribos e/ou fibras) mas com armadura longitudinal, não é possível compensar os efeitos da fendilhação diagonal, condicionando significativamente o comportamento das vigas. Segundo os autores, podem acontecer dois tipos de comportamento nestes casos:

- após a formação da fenda, inclinada, de corte, ou ela se propaga imediatamente, ou fá-lo para uma carga ligeiramente superior, atravessando toda a seção da viga, dividindo-a em duas e colapsando-a. É um fenómeno brusco e sem aviso (*i.e.* frágil);
- ou, a fenda de corte desenvolve-se em direção à zona comprimida do betão (não intersectando-a). Neste caso, não há um colapso repentino e a carga de rotura pode ser maior do que a que originou a formação da primeira fenda.

A Figura 4.8 mostra o pormenor de uma viga na qual se formou uma fenda diagonal de corte, com os mecanismos de resistência internos representados.

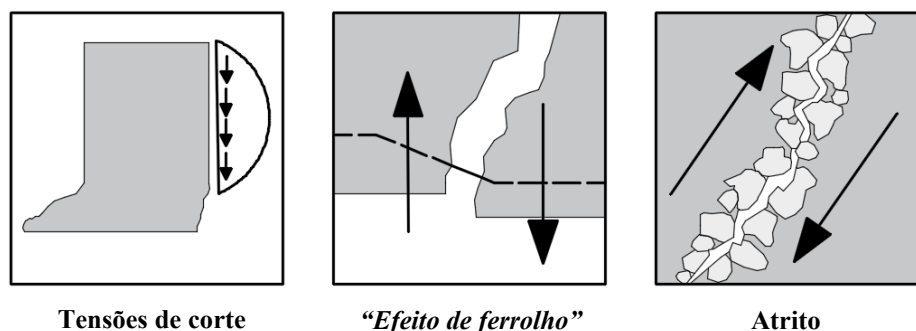


**Figura 4.8 – Mecanismos de resistência ao corte numa viga sem armadura transversal (adaptado de Nilson *et al*, 2010)**

Assim, após a formação da fenda, a resistência ao esforço transverso corresponde à soma de três forças (Expressão 4.1), e que a Figura 4.9 mostra em pormenor (Lúcio, 2006), sendo elas:

- $V_c$  – resultante das tensões de corte na zona comprimida;
- $V_d$  – força na armadura longitudinal devido ao “efeito de ferrolho”;
- $V_a$  – componente vertical da força de atrito entre as faces da fenda, devido ao imbricamento entre agregados.

$$V = V_c + V_d + V_a \quad (4.1)$$



**Figura 4.9 - Pormenores dos mecanismos no esforço transverso (adaptado de Lúcio, 2006)**

#### 4.1.3.2. Vigas Reforçadas com Estribos

A utilização de armadura transversal (*i.e.* estribos) só tem um efeito preponderante após o aparecimento de fendilhação (Nilson *et al*, 2010), provocando um mecanismo de transferência de esforços, mencionado no Subcapítulo 4.1.1, e que é traduzido pelo “*Modelo Clássico de Treliça*”. Então, em vigas com estribos, no cálculo do esforço transverso (Expressão 4.2), é introduzida uma nova componente (Lúcio, 2006):

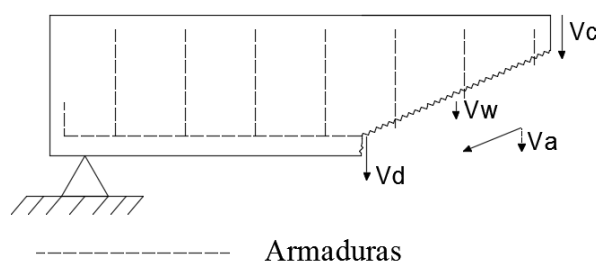
-  $V_w$  – força de tração nas armaduras transversais, que atravessam as fendas de corte.

$$V = V_c + V_d + V_a + V_w \quad (4.2)$$

As restantes componentes também são afetadas pela presença dos estribos (Nilson *et al*, 2010):

- $V_c$  – a presença da armadura transversal restringe a propagação das fendas diagonais em direção à zona de compressão, deixando uma área maior de betão a resistir à ação combinada de corte e compressão;
- $V_d$  – ao envolver a armadura longitudinal com os estribos, cria-se um efeito de cintagem que contribui para a amplificação do efeito de ferrolho;
- $V_a$  – os estribos ajudam a impedir o alargamento das fendas, ou seja, as faces ficam mais próximas umas das outras e o contato é melhorado.

A Figura 4.10 mostra os mecanismos de resistência internos para uma viga com estribos (verticais).



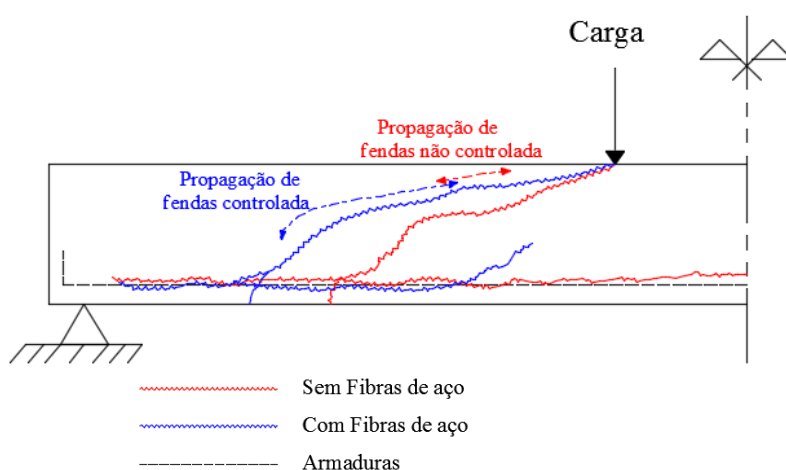
**Figura 4.10 – Mecanismos de resistência ao corte numa viga com armadura transversal vertical (adaptado de Nilson *et al*, 2010)**

#### 4.1.3.3. Vigas Reforçadas com Fibras de Aço

Relativamente às vigas reforçadas com fibras de aço, convém referir que o estudo da sua aplicabilidade ao corte é relativamente recente quando comparado com o uso para resistência à flexão, apesar do efeito das fibras ser mais óbvio na resistência ao esforço transversal. Tal prende-se um pouco com o facto de o fenómeno dominante em elementos em betão armado, em estruturas correntes, na grande generalidade dos casos, ser a flexão (Vitt, 2011).

Como já se mencionou, a utilização das fibras de aço apresenta uma alternativa económica ao uso de estribos. Na verdade, em elementos onde a armadura transversal requerida é a mínima, ela pode ser substituída na sua totalidade por fibras de aço. Mas é preciso ter cautela, pois em casos de forças de corte elevadas tem que existir a presença de estribos, podendo ser, no entanto, obviamente, combinada com a inclusão de fibras (Vitt, 2011).

Abordar-se-á primeiro as vigas sem estribos mas com a inclusão de fibras de aço.



**Figura 4.11 – Viga com e sem fibras de aço (adaptado de Vitt, 2011)**

As fibras permitem que ocorra uma rotura próxima da dúctil, aproximando-se de uma situação com estribos. A Figura 4.11 ajuda a evidenciar as diferenças entre a situação de uma viga sem



reforço ao esforço transversal, ou seja, sem estribos e sem fibras, e de uma viga reforçada com fibras, mas sem estribos. A propagação da fendilhação numa viga com fibras de aço é mais estável e é feita numa área de controlo maior. O efeito das fibras na resistência ao corte pode ser explicado pelo facto de estas interetarem as fendas, mantendo a proximidade das faces (melhorando o imbricamento) e proporcionando uma componente adicional nos mecanismos internos. A resistência após a fendilhação depende de várias condições, incluindo o método e/ou recomendação utilizados na modelação do problema (Vitt, 2011).

Para terminar este subcapítulo, vigas com a combinação de estribos e fibras de aço são também uma solução completamente legítima, em que o uso conjunto se pode traduzir em maiores ganhos do que se se considerassem os efeitos dos estribos e das fibras isoladamente, uma vez que as duas componentes se complementam. A junção de fibras a uma viga já reforçada com armadura transversal irá aumentar o valor da carga resistente e reduzir a abertura de fendas (Vitt, 2011).

Estes conhecimentos permitem fazer um “*jogo*” em que se reduz a quantidade/dimensão de estribos, substituindo-os por fibras de aço, proporcionando uma maior qualidade e rapidez de execução em obra, por exemplo. E este aspeto não é só importante para o esforço transversal, mas também para a flexão.

## **4.2. Flexão**

### **4.2.1. O Fenómeno da Flexão - Caso Geral**

Mais uma vez se verifica a necessidade de explanação de um conceito importante, neste caso o da flexão. Primeiro, convém perceber que o fenómeno da flexão está relacionado com a existência de momento fletor num dado elemento, que corresponde à soma vetorial dos momentos provocados pelas forças externas de um dos lados da seção em relação aos eixos nela contidos, e ocorre no sentido de provocar o giro da seção em torno de um eixo. Em segundo lugar, deve-se ter presente a diferenciação entre dois conceitos: o de flexão pura - em que se considera desprezável o efeito de carregamentos transversais e o de flexão simples - que comporta o efeito do momento fletor e do esforço transversal.

Em vigas de betão armado a rotura por flexão ocorre quando pelo menos um dos materiais, aço ou betão, atinge o seu limite de deformação (Barros, 2009), sendo as causas: ou deformação plástica excessiva do aço, ou rotura do betão.

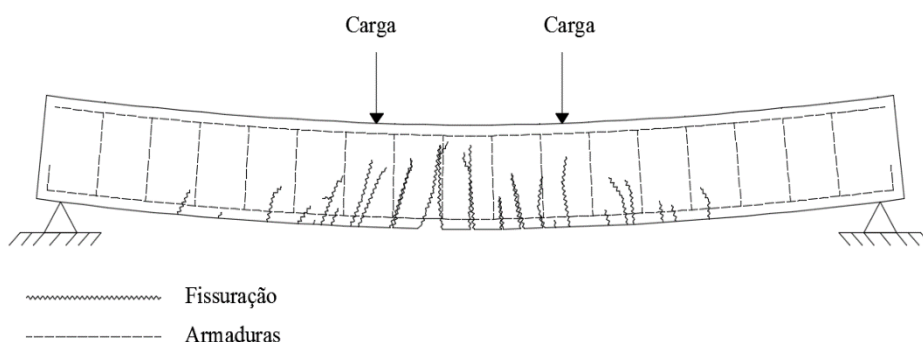
### **4.2.2. Rotura por Flexão em Vigas**

Neste ponto proceder-se-á à descrição dos dois tipos de rotura em flexão, mais uma vez como preparação para os ensaios experimentais.

Os tipos de rotura apresentados são adaptados de Barros (2009) e Leonhardt e Mönning (1977).

#### 4.2.2.1. Deformação Plástica Excessiva do Aço

A deformação plástica excessiva do aço, que usualmente é anunciada pelo surgimento de muitas fendas e pelo desenvolvimento de uma grande flecha, ocorre quando as tensões de tração atuantes num elemento de betão armado (e.g. viga) induzem uma extensão elevada na armadura principal desse mesmo elemento (Figura 4.12). Juntamente com a deformação do aço, pode ainda existir um esmagamento do betão na zona de compressão (Barros, 2009; Leonhardt e Mönning, 1977).



**Figura 4.12 - Deformação plástica do aço numa viga de betão armado**

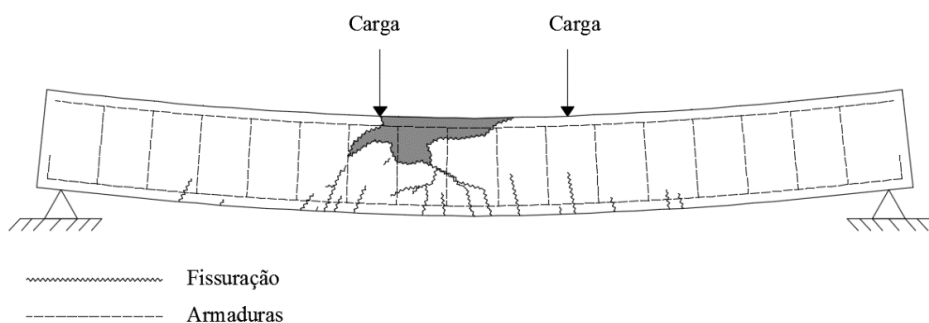
Este tipo de rotura surge geralmente em elementos com percentagens de armadura usuais, onde a extensão limite do aço é atingida antes do esgotamento da zona de compressão no betão, e identifica-se como “*Rotura por Tração na Flexão*” (Leonhardt e Mönning, 1977).

Mas a “*Rotura por Tração na Flexão*” também pode surgir em situações especiais, em que a armadura é muito fraca e em que a força de tração existente no betão é superior à da armadura longitudinal. Assim, dá-se um rompimento extremamente brusco (rotura frágil) da armadura longitudinal com o aparecimento da primeira fenda (Leonhardt e Mönning, 1977).

#### 4.2.2.2. Rotura do Betão

Esta forma de rotura surge, geralmente, em elementos com percentagens de armaduras elevadas ou com armaduras de elevada resistência, em que a extensão máxima do betão é atingida antes da deformação limite do aço da armadura longitudinal, ocorrendo uma falha na zona de compressão do betão (Figura 4.13) (Barros, 2009; Leonhardt e Mönning, 1977).

Este tipo de rotura é designado como “*Rotura por Compressão na Flexão*” e tem um carácter frágil, na medida em que este ocorre bruscamente e sem aviso prévio, até com carácter explosivo, principalmente nos betões de alta resistência (Leonhardt e Mönning, 1977).



**Figura 4.13 - Ruptura do betão comprimido numa viga de betão armado**

### 4.2.3. Resistência à Flexão em Vigas

#### 4.2.3.1. Vigas Reforçadas com Armadura

Vigas sem reforço (*i.e.* armadura) são totalmente ineficientes para resistir a esforços de flexão. As armaduras são colocadas o mais perto possível do extremo com a maior tensão de tração. Na verdade, os elementos em betão armado são heterogêneos, uma vez que são constituídos por dois materiais diferentes: betão e armadura. Assim, a análise é ligeiramente diferente relativamente a elementos de um só tipo de material (*e.g.* aço ou madeira) (Nilson *et al*, 2010).

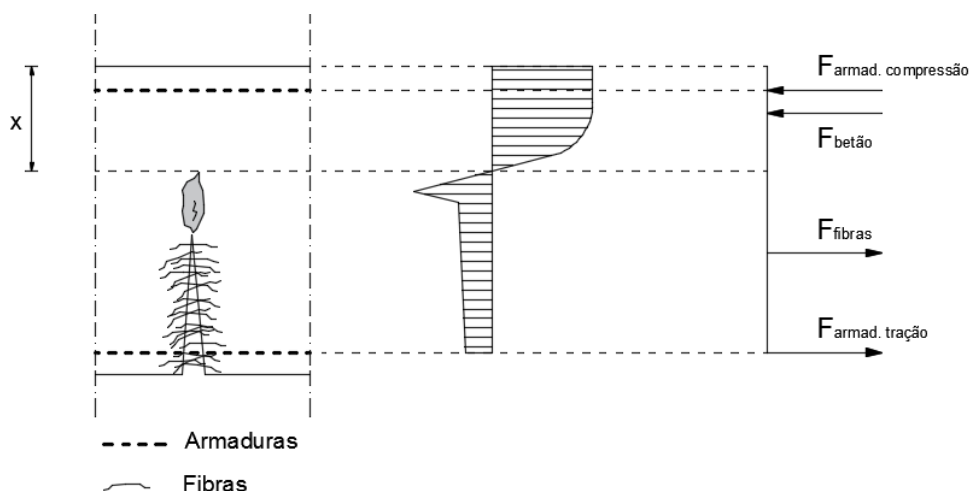
O principal objetivo do reforço metálico (*i.e.* das armaduras) é o de resistir às forças de tração presentes na viga. A função do betão é meramente a de resistir a tensões de compressão. É o funcionamento deste conjunto (binário de forças à tração e compressão) que permite suportar os esforços de flexão. Mas este conjunto só resulta se existir compatibilidade entre o betão e a armadura (*i.e.* aderência) (Nilson *et al*, 2010).

#### 4.2.3.2. Vigas Reforçadas com Fibras de Aço

Já se mencionou que o uso das fibras de aço em vigas pode servir como prossecução do reforço ao esforço transversal, mas ele está mais associado ao contributo para a flexão. As aplicações mais comuns das fibras de aço recorrem à sua resistência à flexão após a fendilhação e à sua utilização como reforço ou emenda de armaduras ordinárias (Vitt, 2011).

É preciso fazer um alerta: embora se possam utilizar as fibras de aço como o único reforço à flexão, em elementos hiperestáticos (*e.g.* laje em contacto com o solo), estas são mais eficientes/económicas quando combinadas com armadura (Vitt, 2011). Quando se utilizam as fibras para esse fim, tem que se ter em conta que estas desempenham um papel secundário no reforço, relacionado, em grande parte, com a fendilhação (ACI 544.4R, 1988). No entanto, a adição de fibras, no geral, resulta num ganho extra para a resistência aos momentos e para a ductilidade das vigas.

O comportamento de uma viga reforçada conjuntamente por armadura e fibras de aço apresenta, aproximadamente, a distribuição de tensões presente na Figura 4.14.



**Figura 4.14 – Distribuição de tensões de um elemento em BRFA fendilhado (adaptado de Robins *et al*, 2001 e RILEM TC 162-TDF, 2003)**

### 4.3. Regulamentação

Existe um grande leque de regulamentos e recomendações que permite o cálculo dos valores resistentes, nomeadamente em vigas, para as situações de betões armados convencionalmente e de betões incorporados de fibras.

Começar-se-á por mencionar os documentos que serão utilizados nos cálculos do esforço transversal e momento resistentes na análise dos resultados (Capítulo 6) e posteriormente far-se-á uma breve referência às alternativas.

#### 4.3.1. Eurocódigo 2

O “Eurocódigo 2 - Projecto de Estruturas de Betão”, uma das normas mais utilizadas na Europa atualmente, foi elaborado pelo CEN (*Comité Européen de Normalisation*) (NP EN 1992-1-1, 2010). Os eurocódigos fornecem regras comuns de cálculo estrutural para a aplicação corrente no projeto de estruturas, e dos seus componentes, e surgem de uma tentativa de harmonização entre as regras técnicas dos estados-membros da União Europeia (NP EN 1992-1-1, 2010).

Embora o EC2 se aplique à grande generalidade dos elementos em betão (normal ou de agregados leves) simples, armado e pré-esforçado, existem algumas lacunas relativas, por exemplo, à utilização de armaduras lisas, ou mais particularmente aos BRFA.

Nos cálculos da análise de resultados (Capítulo 6) utiliza-se o EC2 para o caso das vigas sem fibras de aço.

#### 4.3.2. RILEM TC 162 - TDF

O documento “*RILEM TC 162-TDF - Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*” não é um regulamento, mas antes uma recomendação feita pela RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*), uma união internacional de laboratórios e especialistas fundada em 1947 com o objetivo de promover cooperação científica na área dos materiais de construção e de estruturas (RILEM, 2015). O comité técnico 162 elaborou, em 2003, essa recomendação com o objetivo de criar uma normalização para o ensaio e dimensionamento de elementos em BRFA, aos quais restringe a sua aplicabilidade.

O RILEM TC 162-TDF sustenta-se na metodologia do EC2 (RILEM TC 162-TDF, 2003), por isso, para quem já esteja familiarizado, a sua aplicação é simples e direta. Utilizou-se o RILEM TC 162-TDF, na análise de resultados (Capítulo 6), para o caso das vigas reforçadas com fibras de aço.

#### 4.3.3. Outra

No entanto, existem outros regulamentos e recomendações de referência, das quais se salientam os mais relevantes:

- “*ACI 318-14 - Building Code Requirements for Structural Concrete*” - O American Concrete Institute (ACI) foi fundado em 1904 no estado do Michigan, nos Estados Unidos da América, para promover e disseminar o conhecimento consensual sobre os melhores usos do betão. É ainda responsável por um infindável número de normas, publicações e conferências da área (ACI, 2015). A norma 318, com a última atualização em 2014, é um dos documentos mais importantes dessa organização e estabelece os critérios para os materiais e para o dimensionamento de estruturas de betão (ACI-318, 2014). É um regulamento interessante que inclusive possui comentários que auxiliam na análise do documento. Para além do cálculo de elementos de betão armado normal, o ACI 318-14 permite a utilização de fibras de aço, embora com alguns condicionalismos, e faz uso, complementarmente, da norma ASTM C1609 (2012) para o cálculo das tensões originadas pelas fibras de aço.

- “*EHE – 08: Code on Structural Concrete*” – O EHE (*Instrucción de Hormigón Estructural*) de 2008 é o código espanhol para betão estrutural, que entretanto coexiste com o EC2, que tem como objetivo estabelecer requisitos que devem ser cumpridos durante o dimensionamento, execução e manutenção de estruturas de betão (EHE-08, 2010). O documento é dotado de um anexo que contempla recomendações relativamente ao uso de

BRFA. As expressões para o cálculo dos valores do esforço transversal e do momento resistentes em BRFA são exatamente iguais às do RILEM TC 162 TDF, diferindo meramente na forma como são calculadas as tensões e as extensões resultantes da incorporação das fibras no betão. Já o cálculo do valor de esforço transversal e momento resistentes para betões normais envolve expressões semelhantes ao do EC2.

- “*FIB Model Code for Concrete Structures 2010*” – O “*Model Code 1990*” (MC90) foi um dos documentos mais importantes publicados pelo CEB (*Comité Euro-International du Béton*) e pela FIP (*Fédération Internationale de la Précontrainte*), que serviu como fonte de informação para a elaboração do EC2 (CEB-FIP, 1990). No entanto, devido a algumas lacunas do MC90, as duas organizações, agora fundidas na FIB (*Fédération Internationale du Béton*), decidiram produzir um novo documento: o “*Model Code 2010*” (MC10) (Walraven e Vliet, 2011; FIB, 2010). O MC10, entretanto atualizado em 2012, já contém disposições para o dimensionamento de estruturas em BRFA, para além das estruturas de betão simples obviamente. O cálculo do esforço transversal resistente envolve a consideração em conjunto do contributo do betão e das fibras, ao contrário do RILEM TC 162 TDF e do EHE-08. Por outro lado, o cálculo do momento resistente envolve a utilização dos valores da abertura de fendas ou um método alternativo e simplificado. Alerta-se que para betões normais (*i.e.* sem fibras), o MC10 apresenta expressões que diferem ligeiramente das utilizadas no EC2.

Em resumo:

- para o caso de betões normais, as expressões para determinação dos valores resistentes ao corte e à flexão dos regulamentos são um pouco diferentes umas das outras, sendo umas mais conservativas do que outras;
- para o caso de betões com fibras de aço, no geral, as expressões dos vários regulamentos/recomendações (aplicáveis) são análogas. O que difere, essencialmente, é a metodologia de cálculo das tensões de tração e de tração por flexão.

Para terminar este capítulo, alerta-se que neste trabalho não é importante o estudo comparativo entre os vários regulamentos, existindo já bons trabalhos que se dedicam a tal, quer relativamente à análise do esforço transversal, quer relativamente à análise da flexão (*e.g.* Gomes, 2013 e Sousa, 2014).

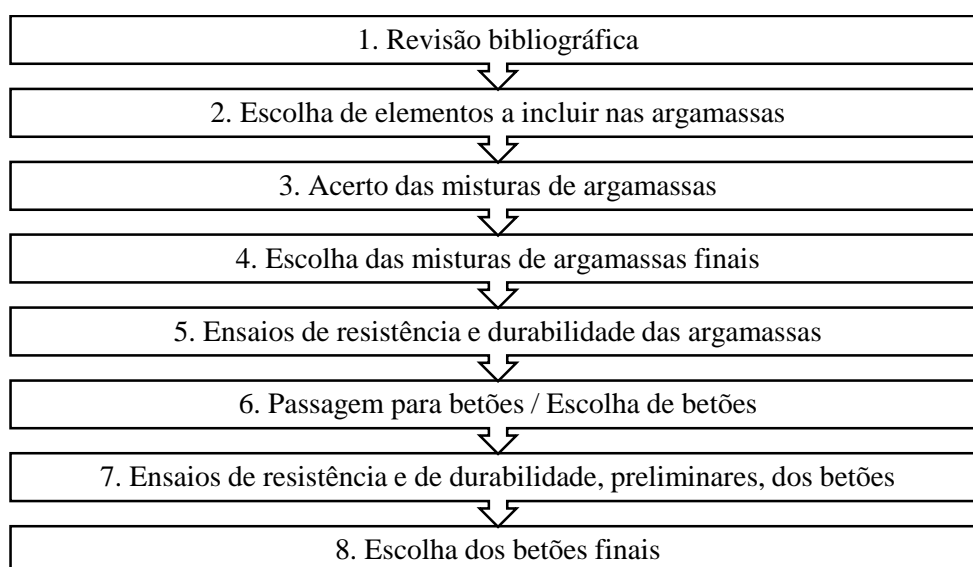
## Capítulo 5 – Programa Experimental

Neste capítulo apresentar-se-á todo o programa experimental desenvolvido no âmbito da presente dissertação, no qual se incluem a caracterização das misturas, os ensaios experimentais utilizados para determinação das características resistentes dos betões e os ensaios experimentais de rotura das vigas por corte e por flexão, antecidos de uma breve descrição do projeto de investigação no qual esta dissertação está englobada.

### 5.1. Evolução do Projeto de Investigação

Como já se referiu, a presente dissertação insere-se numa investigação conjunta entre o *Instituto Superior de Engenharia de Coimbra* e a empresa *Smart Inovation, Lda*. A pesquisa elaborada pelas investigadoras Lourenço e Soldado, centrou-se, em parte, no sentido de averiguar quais as melhores soluções de argamassas e betões incorporando nanopartículas, tendo em conta valores de resistência e de durabilidade. Esta dissertação foca-se mais no comportamento mecânico de elementos que incluam essas mesmas misturas, mais concretamente vigas. Embora haja esta pequena distinção, todo o processo de investigação foi acompanhado e auxiliado desde o início no sentido de não só perceber toda uma evolução de raciocínio experimental, mas também de tomar parte das decisões e ainda de complementar essa mesma investigação.

Para melhor compreensão da evolução do programa experimental do projeto de investigação, cujo fim era uma escolha adequada das misturas para posterior ensaio ao corte e à flexão (e outros ensaios), apresenta-se o fluxograma constante na Figura 5.1, que representa, de certa forma, uma síntese das várias etapas (passos) do projeto.



**Figura 5.1 – Evolução do programa experimental do projeto de investigação**

Podem-se encontrar mais informações sobre as argamassas acertadas (incluindo o estudo detalhado) (passos 2 a 5) no artigo “*Influência da Adição de Nano-Partículas no Desempenho da Matriz do Betão*” das 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas (Soldado *et al*, 2014), já mencionado.

Existiram vários patamares de decisão, sendo, porém, os mais importantes o da escolha das argamassas finais (passo 4) e o da sua passagem para betões (passo 6). Por forma a tornar a investigação centrada e focada, optou-se por utilizar apenas 8 misturas, deliberação que teve em conta valores preliminares obtidos laboratorialmente e registos bibliográficos.

Após a escolha dos betões finais (passo 8), que se encontram discriminados nos Quadros 5.1, 5.2 e 5.3 do Subcapítulo 5.2.1, iniciou-se efetivamente o programa experimental desta dissertação, ou seja, todo o procedimento de caracterização do betão, das fibras e da análise do comportamento ao corte e à flexão.

Esta dissertação e a do mestrando Rui Ismael (“*Estudo da Aderência e Fendilhação em Elementos de Betão Incorporando Nanopartículas*”) fazem parte de um objetivo comum, inserido no projeto de investigação, como tal foi definido *a priori* que as composições dos betões finais seriam iguais nestes dois trabalhos (no passo 8 da Figura 5.1). Efetivamente, se se considerar toda a investigação em conjunto com as dissertações referidas, obter-se-á um estudo detalhado, que em muito contribuirá para o aumento do conhecimento dos nanobetões.

## **5.2. Caracterização das Misturas**

Uma parte crucial de um programa experimental, como o que se elaborou, é a caracterização das misturas de betão, uma vez que este é um elemento principal e cujas características/comportamento se pretendem conhecer. Como tal, é essencial ter conhecimento quer da composição do betão, e os atributos de cada um dos constituintes do mesmo, quer dos resultados de ensaios normalizados no estado fresco e no estado endurecido.

Pretendeu-se realizar uma caracterização detalhada do betão para averiguar de forma rigorosa o comportamento do mesmo e para posterior compreensão dos resultados dos ensaios estruturais.

### **5.2.1. Composições**

A investigação, como já se mencionou, conduziu a uma escolha criteriosa de misturas de betão. Foram oito as misturas escolhidas e tal escolha foi feita atendendo a valores experimentais, nomeadamente resistências à compressão e à tração, às suas durabilidades e às suas viabilidades (auferidas no projeto de investigação), ou seja, a intrínseca condição de se poderem ensaiar elementos (*e.g.* vigas) que produzissem resultados esclarecedores e otimizados.



De uma forma sintetizada, os betões escolhidos para produção das vigas, para posterior ensaio ao corte e à flexão, apresentam-se nos Quadros 5.1, 5.2 e 5.3, os quais contêm as massas dos diversos constituintes e as proporções para 1  $m^3$  de cada tipo de betão.

As designações das misturas justificam-se da seguinte maneira:

- 350 e 550 - betões de referência, relacionados com uma dosagem de 350 e 550  $kg/m^3$  de ligante, respetivamente, nas argamassas do projeto de investigação (e não nos betões);
- 350Si2%, 350Al2%, 550Si2% e 550Al2% - betões com adição de 2 % de nanopartículas, sílica (Si) e alumina (Al), também relacionados com uma dosagem de 350 e 550  $kg/m^3$  de ligante nas argamassas do projeto de investigação;
- 550F0,5 e 550Al2%F0,5 - betões de referência e com nanoalumina incorporada, respetivamente, para a classe de 550  $kg/m^3$  das argamassas, constituídos, ainda, por 0,5 % de fibras de aço.

Daqui para a frente, por forma a simplificar a análise, distinguir-se-ão, frequentemente, as misturas (e as vigas) em duas séries: 350 e 550.

**Quadro 5.1 – Composição dos betões (1)**

Constituinte	Designação	350		350Si2%		350Al2%	
		Massa (kg)	Volume (litros)	Massa (kg)	Volume (litros)	Massa (kg)	Volume (litros)
Cimento	CEM I 52,5 R	230,0	74,0	223,0	71,0	223,0	71,0
Adições	Fíler calcário	120,0	44,0	120,0	44,0	120,0	44,0
	SiO <sub>2</sub>	---	---	7,0	3,0	---	---
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	---	---	---	7,0	2,0
Agregados Finos	Areia Fina 0/1	227,0	86,0	228,0	87,0	229,0	87,0
	Areia Média 0/4	681,0	259,0	684,0	260,0	688,0	261,0
Agregados Grossos	Areão 4/8	187,0	71,0	188,0	71,0	188,0	71,0
	Brita 6/14	755,0	284,0	760,0	286,0	759,0	285,0
Adjuvante	Glenium SKY 526	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8
Água	Efetiva	161,0	161,0	156,0	156,0	156,0	156,0
	Absorção	---	---	---	---	---	---
Ar da pasta	Ar	---	20,0	---	20,0	---	20,0
Fibras	Dramix® RL 45/30 BN	---	---	---	---	---	---

Quadro 5.2 – Composição dos betões (2)

Constituinte	Designação	550		550Si2%		550Al2%	
		Massa (kg)	Volume (litros)	Massa (kg)	Volume (litros)	Massa (kg)	Volume (litros)
Cimento	CEM I 52,5 R	350,0	112,0	343,0	110,0	343,0	110,0
Adições	Filer calcário	---	---	---	---	---	---
	SiO <sub>2</sub>	---	---	7,0	3,0	---	---
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	---	---	---	7,0	2,0
Agregados Finos	Areia Fina 0/1	239,0	91,0	238,0	91,0	240,0	91,0
	Areia Média 0/4	718,0	273,0	715,0	272,0	719,0	273,0
Agregados Grossos	Areão 4/8	190,0	72,0	190,0	72,0	190,0	72,0
	Brita 6/14	770,0	289,0	769,0	289,0	770,0	289,0
Adjuvante	<i>Glenium SKY 526</i>	2,1	2,0	2,7	2,6	2,4	2,3
Água	Efetiva	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0
	Absorção	---	---	---	---	---	---
Ar da pasta	Ar	---	20,0	---	20,0	---	20,0
Fibras	<i>Dramix® RL 45/30 BN</i>	---	---	---	---	---	---

Quadro 5.3 – Composição dos betões (3)

Constituinte	Designação	550F0,5		550Al2%F0,5	
		Massa (kg)	Volume (litros)	Massa (kg)	Volume (litros)
Cimento	CEM I 52,5 R	350,0	112,0	343,0	110,0
Adições	Filer calcário	---	---	---	---
	SiO <sub>2</sub>	---	---	---	---
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	---	7,0	1,8
Agregados Finos	Areia Fina 0/1	239,0	91,0	240,0	91,0
	Areia Média 0/4	718,0	273,0	719,0	273,0
Agregados Grossos	Areão 4/8	190,0	72,0	190,0	72,0
	Brita 6/14	770,0	289,0	770,0	289,0
Adjuvante	<i>Glenium SKY 526</i>	2,1	2,0	2,1	1,9
Água	Efetiva	140,0	140,0	140,0	140,0
	Absorção	---	---	---	---
Ar da pasta	Ar	---	20,0	---	20,0
Fibras	<i>Dramix® RL 45/30 BN</i>	39,3	---	39,3	---

## 5.2.2. Materiais

### 5.2.2.1. Ligantes

A escolha do cimento utilizado na produção dos betões para colocação nas vigas foi feita tendo em conta, essencialmente, a resistência à compressão pretendida. Como tal, fez-se uso de um cimento do tipo CEM I 52,5 R, produzido pela *Secil*.

Na composição das misturas 350, 350Si2% e 350Al2%, além do cimento referido, foi utilizada uma dosagem de fíler calcário para que não se recorresse a uma dosagem reduzida de ligante, mas também por não estarem disponíveis em laboratório cimentos de outras classes de resistência (*e.g.* 42,5 e 32,5), sendo o objetivo obter uma resistência mais baixa.

A Figura 5.2 ilustra o aspeto do cimento e do fíler calcário utilizados, com escala para referência.



Cimento

Fíler calcário

**Figura 5.2 – Aspeto macroscópico dos ligantes utilizados**

No quadro 5.4 apresentam-se as massas volúmicas dos ligantes.

**Quadro 5.4 – Massas volúmicas dos ligantes**

Ligante	Massa volúmica ( $kg/dm^3$ )
CEM I 52,5 R	3,16
Fíler Calcário	2,70

### 5.2.2.2. Agregados

Foram utilizados dois tipos de areias, provenientes da empresa *Argilis*: areia fina 0/1 *mm* e areia média 0/4 *mm* (Figura 5.3).



**Areia fina  
0/1 *mm***

**Areia média  
0/4 *mm***

**Figura 5.3 – Aspetto macroscópico dos agregados finos**

Para a granulometria maior (*i.e.* agregados grossos), utilizaram-se dois tipos de agregados: areão 4/8 *mm* e brita 6/14 *mm*. Ambos foram produzidos pela empresa *Omya Comital* (Figura 5.4).



**Areão  
4/8 *mm***

**Brita  
6/14 *mm***

**Figura 5.4 – Aspetto macroscópico dos agregados grossos**

No Quadro 5.5 apresenta-se, para cada tipo de agregado, a massa volúmica.

**Quadro 5.5 – Massas volúmicas dos agregados**

Agregado	Massa volúmica ( $\text{kg/dm}^3$ )
Areia Fina 0/1 mm	2,63
Areia Média 0/4 mm	2,63
Areão 4/8 mm	2,63
Brita 6/14 mm	2,66

### 5.2.2.3. Nanopartículas

As nanopartículas inserem-se na categoria das adições e foram utilizados apenas dois tipos no fabrico dos betões: nanoalumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e nanosílica ( $\text{SiO}_2$ ). Foram produzidas em pó (Figura 5.5), à base de óxidos e com pureza mínima de 99,5 %, pela empresa *Smart Inovation, Lda*.

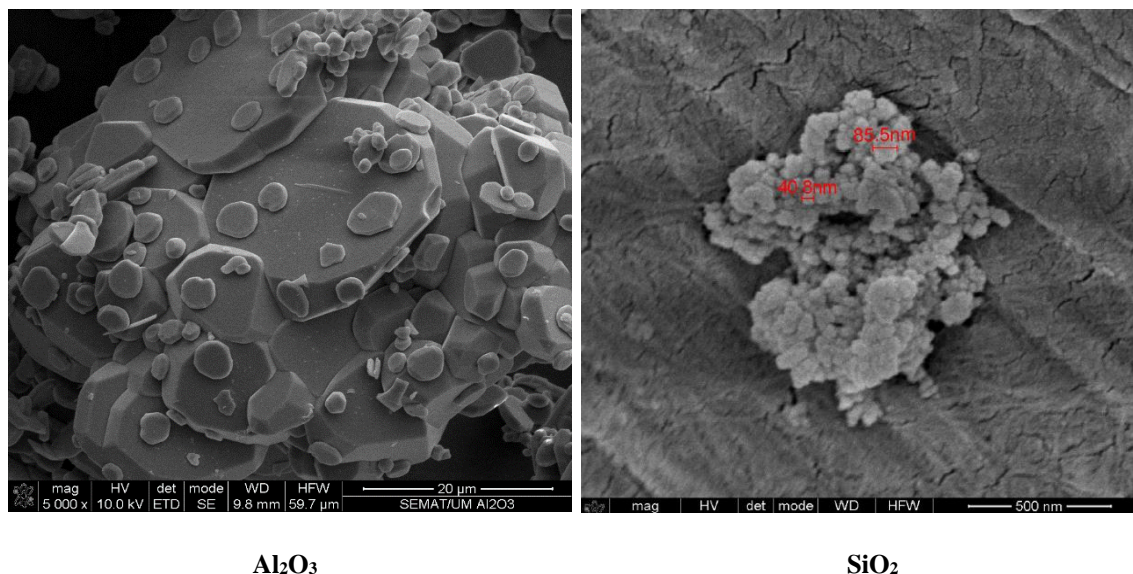


**Figura 5.5 – Aspeto macroscópico das nanopartículas de  $\text{SiO}_2$**

Por não terem diferenciação a nível macroscópico, a empresa *Smart Inovation, Lda* forneceu imagens reproduzidas através de um SEM das nanopartículas utilizadas na composição de algumas das vigas e que se apresentam na Figura 5.6.

Alerta-se para o facto de as partículas de nanoalumina utilizadas apresentarem a maior dimensão superior à nanoescala, resultado do processo de produção utilizado (procurou-se minimizar os encargos).





**Figura 5.6 - Imagens SEM das nanopartículas (*Smart Inovation, Lda*)**

O Quadro 5.6 indica as massas volúmicas das nanopartículas.

**Quadro 5.6 – Massas volúmicas das nanopartículas**

Nanopartículas	Massa volúmica ( $\text{kg/dm}^3$ )
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,95
$\text{SiO}_2$	2,22

As nanopartículas foram dissolvidas em água, aquando da sua introdução no betão, para tentar viabilizar a melhor dispersão possível.

#### 5.2.2.4. Adjuvante e Água

O adjuvante escolhido foi o superplastificante *Glenium SKY 526* (também denominado *MasterGlenium*), produzido pela empresa *BASF* e feito à base de polímeros de éter policarboxílico (PCE), permitindo uma eficaz hidratação do cimento e cuja massa volúmica é de  $1,06 \text{ kg/dm}^3$  (Figura 5.7).

A dosagem teve em conta os valores resultantes do acerto das misturas das argamassas no processo de investigação.



**Figura 5.7 – Embalagem e aspeto do adjuvante *Glenium SKY 526***

A água utilizada nas misturas foi água da rede pública de abastecimento, apta para ser utilizada na produção de betão.

#### 5.2.2.5. Fibras

A quantidade de fibras utilizada para as misturas de betão foi escolhida tendo em conta referências bibliográficas, que apontam para valores ótimos de fibras na ordem dos 0,5 a 2 % quer em BRFA (Gomes, 2013) quer em betões com nanopartículas (Zhang *et al*, 2014). Como tal, para todas as misturas com fibras metálicas incorporadas, sem exceção, e após a realização de algumas amassaduras de teste (com o objetivo de averiguar a trabalhabilidade do betão) optou-se pela utilização de uma quantidade de 0,5 %, tal como está explícito nos Quadros 5.1 a 5.3 no Subcapítulo 5.2.1. Refere-se, porém, que a utilização de uma quantidade de fibras próxima de 1 % seria igualmente viável.

A incorporação das fibras foi feita por substituição de agregados grossos. As fibras selecionadas para a execução das misturas foram do tipo *DRAMIX*® RL 45/30 BN (Figura 5.8), da empresa *Bekaert*. A identificação das fibras é explicada da seguinte forma:

- R – dupla ancoragem nas extremidades;
- L – fibras produzidas soltas entre si;
- 45 – classe, relacionada com o fator de forma ( $l/d_f$ );
- 30 – comprimento, em *mm* ( $l_f$ );
- B – aço claro sem cobrimento (“*coating*”);
- N – baixo teor de carbono.



**Figura 5.8 – Aspeto macroscópico das fibras utilizadas**

Apresenta-se ainda a informação do Quadro 5.7, que inclui as propriedades das fibras de aço, constantes na ficha técnica das mesmas.

**Quadro 5.7 – Propriedades das fibras utilizadas (adaptado de ArcelorMittal, 2010)**

<b>DRAMIX® RL 45/30 BN</b>	
<b>Classe</b>	45
<b>Comprimento (<math>l_f</math>)</b>	30 mm
<b>Diâmetro (<math>d_f</math>)</b>	0,62 mm
<b>Fator de forma (<math>l/d_f</math>)</b>	48
<b>Resistência à tração</b>	1100 MPa
<b>Fibras/kg</b>	13000

### 5.3. Caracterização das Armaduras

Passando à descrição das armaduras, quer para a armadura longitudinal, quer para a armadura transversal das vigas, utilizaram-se varões de aço da classe de resistência A500 NR SD, ou seja, varões nervurados, laminados a quente de alta aderência e de ductilidade especial. As armaduras foram produzidas pela empresa *Visferação* (Figura 5.9 - as armaduras em cima são das vigas para ensaio ao corte, enquanto as armaduras em baixo são das vigas para ensaio à flexão).

Os diâmetros dos varões utilizados foram os seguintes: 6 mm ( $\varnothing 6$ ), 8 mm ( $\varnothing 8$ ) e 16 mm ( $\varnothing 16$ ).





**Figura 5.9 - Aspeto das armaduras utilizadas nas vigas**

Devido a condicionamentos do projeto de investigação, não foi possível realizar ensaios de tração em provetes de aço, utilizando-se como valores de módulo de elasticidade ( $E_s$ ), de tensão de cedência ( $f_{sy}$ ) e de tensão de rotura ( $f_{su}$ ), bem como as extensões associadas a cada uma dessas tensões ( $\epsilon_{sy}$  e  $\epsilon_{su}$ ), os fornecidos regulamentarmente (EC2), que se apresentam no Quadro 5.8.

**Quadro 5.8 - Características estimadas do aço utilizado (EC2)**

	Aço	Tração				$E_s$ (GPa)
		$f_{sy}$ (MPa)	$f_{su}$ (MPa)	$\epsilon_{sy}$ (‰)	$\epsilon_{su}$ (‰)	
EC2	A 500 NR SD	500	550	2,5	12,0	200

#### 5.4. Características Resistentes do Betão

Para a determinação das características resistentes mais pertinentes do betão foram realizados os ensaios constantes no Quadro 5.9.

**Quadro 5.9 – Ensaio de caracterização do betão realizados**

Ensaio	Norma
Massa volúmica do betão endurecido	NP EN 12390-7:2009
Resistência à compressão de provetes	NP EN 12390-3:2011
Resistência à tração por compressão de provetes	NP EN 12390-6:2011
Determinação do módulo de elasticidade em compressão	LNEC E397:1993
Resistência à tração por flexão	NP EN 12390-5:2009

Como nota, justifica-se a opção de não incluir ensaios do betão no estado fresco, mais concretamente, o ensaio de abaixamento, com a existência de condicionalismos laboratoriais, não tendo sido possível fazer a averiguação da trabalhabilidade para o caso em estudo. Sendo assim, apresentam-se apenas os ensaios no estado endurecido.

Os ensaios de caracterização de betão realizados no âmbito desta dissertação foram usados como confirmação/validação dos ensaios e resultados preliminares obtidos no projeto de investigação. Ou seja, foram ensaios realizados com as composições utilizadas nas vigas.

### **5.4.1. Ensaios do Betão no Estado Endurecido**

#### **5.4.1.1. Massa Volúmica**

A determinação da massa volúmica do betão, para cada tipo de betão, foi feita através de uma pesagem de provetes cúbicos numa balança de precisão, dividindo a sua massa pelo respetivo volume (NP EN 12390-7, 2009).

Os resultados obtidos encontram-se mais à frente, no Quadro 5.10 do Subcapítulo 5.4.1.6.

#### **5.4.1.2. Resistência à Compressão**

É objetivo premente, após a produção das amassaduras, determinar a resistência à compressão do betão ( $f_c$ ) através do procedimento preconizado pela norma NP EN 12390-3 (2011).

Para tal, foram ensaiados três provetes cúbicos de dimensão  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$  nas idades de 7 dias e 28 dias (para aferição da evolução das resistências numa fase anterior à betonagem das vigas) e dois provetes cúbicos de dimensão  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$  (Figura 5.10) também na idade de 28 dias e no dia de ensaio das vigas armadas (cerca de 75 dias após a betonagem).



**Figura 5.10 – Provetes cúbicos para ensaio à compressão ( $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ )**

O procedimento de ensaio foi igual para todos os provetes e todas as misturas. Fez-se a cura dos provetes em imersão num tanque de água a uma temperatura de 20 °C até ao dia anterior ao do ensaio. Posteriormente, utilizou-se uma prensa hidráulica para levar à rotura os provetes (Figura 5.11), a uma velocidade constante de 6 kN/s para provetes 100×100×100 mm<sup>3</sup> e de 13,5 kN/s para provetes 150×150×150 mm<sup>3</sup>. Através do quociente entre a força de rotura e a área comprimida do provete, determinou-se a resistência à compressão do betão. Depois, foi feita uma média aritmética dos valores obtidos por forma a obter os valores médios da tensão resistente ( $f_{cm,cubo}$ ).



**Figura 5.11 – Ensaio de resistência à compressão**

Por serem mais relevantes os valores de tensão de rotura à compressão em cilindros ( $f_{cm,cil}$ ) para posterior análise de resultados (Capítulo 6), os seus valores foram obtidos através da Expressão 5.1 (Costa e Appleton, 2002).

$$f_{cm,cil}(MPa) \approx f_{cm,cubo} (28 \text{ dias}) \times 0,8 \quad (5.1)$$

Os resultados obtidos encontram-se mais à frente, no Quadro 5.10 do Subcapítulo 5.4.1.6.

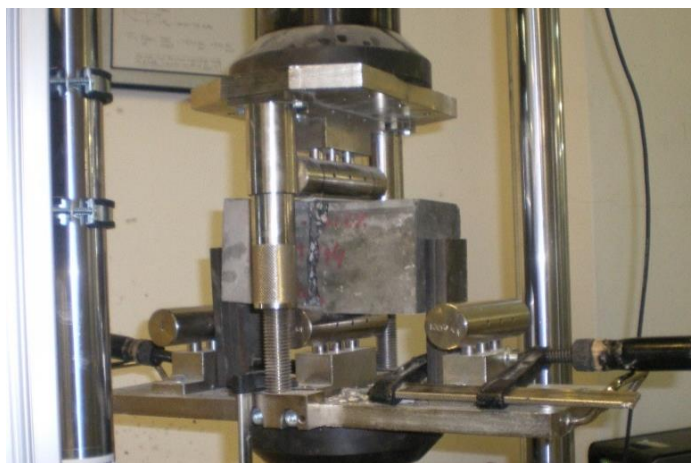
#### **5.4.1.3. Resistência à Tração por Compressão Diametral**

A norma NP EN 12390-6 (2011) preconiza o procedimento de ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral. O valor médio da resistência à tração ( $f_{ctm}$ ) foi determinado através do ensaio de compressão em provetes prismáticos de 100×100×200 mm<sup>3</sup> (Figura 5.12), em vez dos habituais cilindros (devido a limitações relativamente aos moldes disponíveis), mas que é previsto no “Anexo A” da referida norma. A aplicação da carga foi

constante e de valor igual a 0,8 kN/s, até à rotura. O valor da tensão de rotura ( $f_{ct}$ ), para cada provete, foi calculado utilizando a Expressão 5.2.

$$f_{ct}(MPa) = 1,1 \times \frac{2 \times F_p}{\pi \times a_p^2} \quad (5.2)$$

*Legenda:* 1,1 – fator de correção (uma vez que os provetes prismáticos tendem a ter valores superiores aos cilíndricos em 10 %);  $F_p$  – força de rotura do provete (N);  $a_p$  – aresta de menor dimensão do provete (mm);



**Figura 5.12 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral**

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 5.10 do Subcapítulo 5.4.1.6.

#### **5.4.1.4. Módulo de Elasticidade**

Para a determinação do valor do módulo de elasticidade ( $E_c$ ) recorreu-se à aplicação de uma carga cíclica entre dois níveis de tensão, em apenas um provete prismático de 100×100×400 mm<sup>3</sup> de dimensão (LNEC E 397, 1993). Para medir as deformações que ocorreram em cada ciclo, colaram-se, em cada uma de duas faces opostas do prisma, duas pastilhas *demec* e mediu-se a variação da dimensão longitudinal, entre as pastilhas, com um alongâmetro (Figura 5.13). O procedimento foi concluído quando a diferença entre as deformações de ciclos consecutivos foi inferior à condição de convergência da norma. O ensaio de cada provete foi realizado num dia próximo ao dia de ensaio das vigas.

Os resultados obtidos são apresentados, também, no Quadro 5.10 do Subcapítulo 5.4.1.6.

---



**Figura 5.13 – Determinação do módulo de elasticidade em provete prismático**

#### **5.4.1.5. Resistências à Tração por Flexão**

Por não existir equipamento disponível para a determinação da resistência à tração por flexão e das resistências residuais pela norma EN 14651 (2007), utilizou-se a norma NP EN 12390-5 (2009), que define um procedimento similar. Os ensaios de flexão de três pontos foram realizados recorrendo a dois provetes prismáticos de  $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$  para cada mistura de betão com fibras (550F0,5 e 550A12%F0,5), com uma distância entre apoios de  $300 \text{ mm}$ , e com a utilização de dois LVDTs verticais colocados a meio vão em faces opostas (Figura 5.14).



**Figura 5.14 – Ensaio de tração por flexão**

Cada provete tinha a potencialidade de permitir a realização de dois ensaios: os dois provetes da série 550F0,5 possibilitaram a realização de dois ensaios no total, enquanto os dois provetes da série 550A12%F0,5 a realização de três.

A norma EN 14651 (2007) estabelece que a determinação das resistências residuais de flexão ( $f_R$ ) pode ser feita tendo em conta a flecha a meio vão, em alternativa à medição da abertura do entalhe (*Crack Mouth Opening Displacement* - CMOD), ou seja, pode ser feita pelo ensaio da norma EN 12390-5 (2009).

O cálculo das tensões residuais ( $f_{R1}$ ,  $f_{R2}$ ,  $f_{R3}$  e  $f_{R4}$ ) é feito a partir da Expressão 5.3:

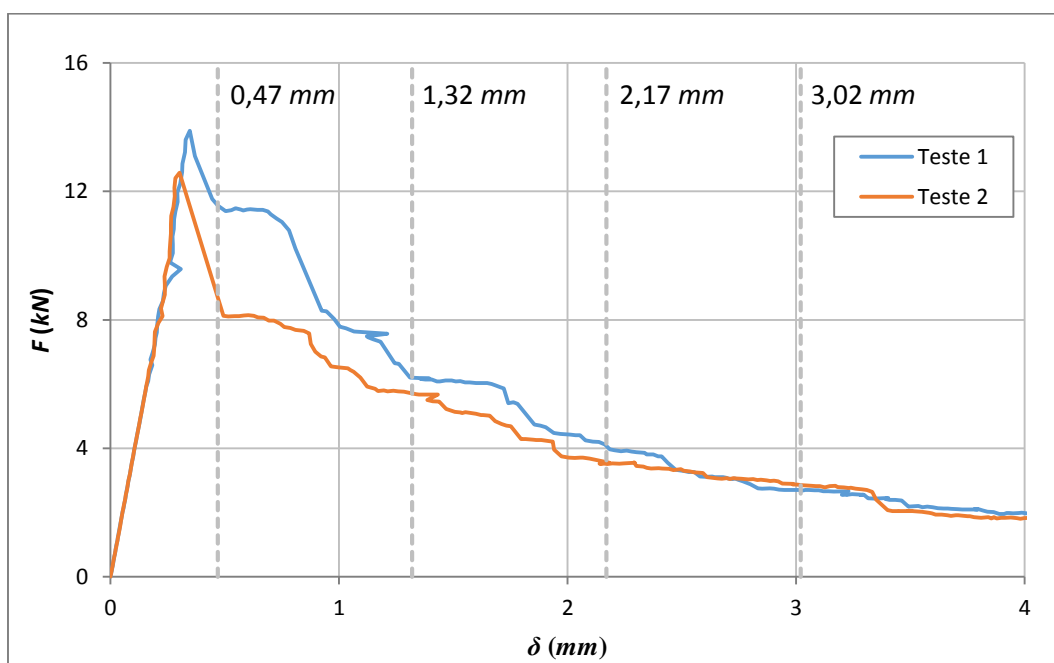
$$f_{Ri} \text{ (MPa)} = \frac{3}{2} \times F_i \times 10^3 \times \frac{l_R}{b_R \times h_R^2} \quad (5.3)$$

*Legenda:*  $F_i$  – força (kN);  $l_R$  – distância entre apoios (mm);  $b_R$  – largura do provete (mm);  $h_R$  – altura do provete (mm).

A força  $F_i$  está relacionada com a flecha central da seguinte forma:  $F_1$  – força correspondente a uma flecha central de 0,47 mm;  $F_2$  – força correspondente a uma flecha central de 1,32 mm;  $F_3$  – força correspondente a uma flecha central de 2,17 mm;  $F_4$  – força correspondente a uma flecha central de 3,02 mm;

O cálculo da tensão de tração por flexão ( $f_{ct,fl}$ ) é também realizado usando a Expressão 5.3, onde  $F$  a utilizar corresponde ao valor máximo ( $F_{máx}$ ).

Os diagramas obtidos nos ensaios de tração por flexão, carga ( $F$ ) – deslocamento ( $\delta$ ), constam nas Figuras 5.15 e 5.16, enquanto os resultados obtidos encontram-se resumidos mais adiante, no Quadro 5.11 do Subcapítulo 5.4.1.6.



**Figura 5.15 – Diagramas carga-deslocamento dos ensaios tração por flexão – 550F0,5**



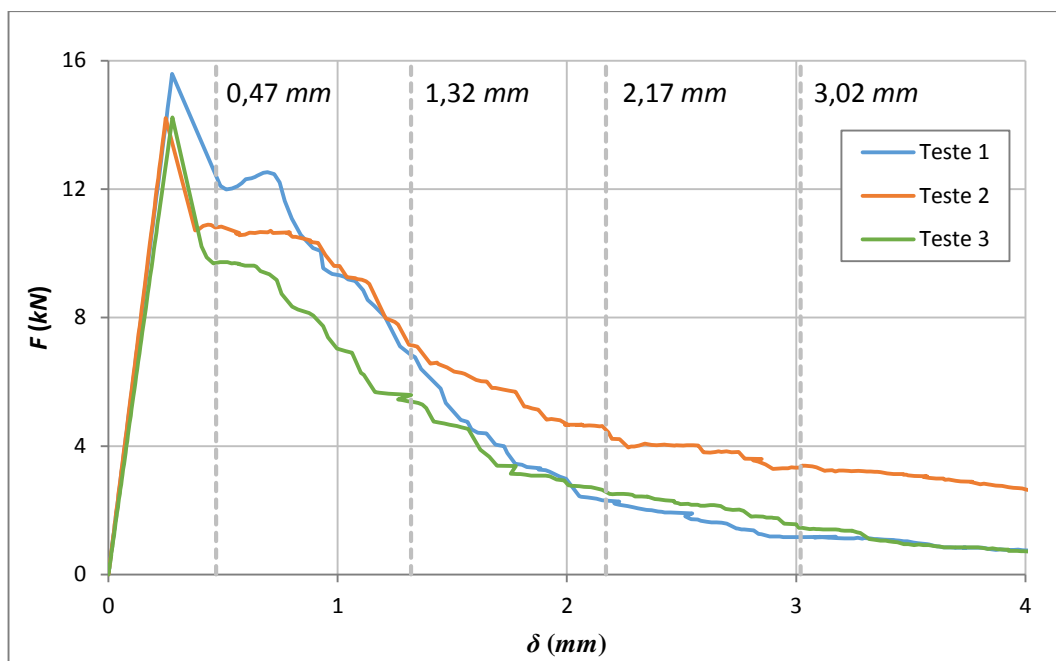


Figura 5.16 – Diagramas carga-deslocamento dos ensaios tração por flexão – 550Al2%F0,5

#### 5.4.1.6. Resultados

Os resultados obtidos para os ensaios da resistência à compressão (incluindo a conversão feita para cilindros), da resistência à tração e do módulo de elasticidade, referidos anteriormente, estão apresentados no Quadro 5.10 (<sup>l</sup> - Provetes 100×100×100 mm<sup>3</sup>).

Quadro 5.10 – Resultados dos ensaios de compressão, tração e módulo de elasticidade

Betão	Massa Volúmica (kg/dm <sup>3</sup> )	Compressão $f_{cm,cubo}$ (MPa)				Compressão $f_{cm,cil}$ (MPa)	Tração $f_{ctm}$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
		7 Dias <sup>l</sup>	28 Dias <sup>l</sup>	28 Dias	Dia de Ensaio	Valor de Cálculo	Dia de Ensaio	>28 Dias
350	2,36	38,7	43,8	40,1	39,6	32,1	4,8	38,7
350Si2%	2,37	35,2	41,3	43,3	42,4	34,6	4,1	41,9
350Al2%	2,37	38,0	41,3	40,1	39,3	32,1	4,5	49,2
550	2,41	59,7	72,1	74,2	81,2	59,3	5,7	51,4
550Si2%	2,41	68,6	68,6	74,1	76,1	59,3	7,2	52,6
550Al2%	2,41	64,1	76,0	72,7	80,1	58,2	6,9	52,6
550F0,5	2,41	60,8	72,7	79,1	82,4	63,2	5,3	53,8
550Al2%F0,5	2,41	57,3	70,1	78,5	81,6	62,8	5,4	49,2

Por outro lado, no Quadro 5.11 resumem-se os valores médios obtidos na tração por flexão dos provetes com fibras.

**Quadro 5.11 – Resultados dos ensaios de tração por flexão**

Betão	Tração por flexão $f_{ctm, fl}$ (MPa)	Tração residual por flexão			
		$f_{Rm1}$ (MPa)	$f_{Rm2}$ (MPa)	$f_{Rm3}$ (MPa)	$f_{Rm4}$ (MPa)
<b>550F0,5</b>	5,96	4,43	2,69	1,72	1,25
<b>550A12%F0,5</b>	6,61	4,89	2,94	1,39	0,89

Do Quadro 5.10 percebe-se que existe, no geral, uma boa correlação entre os valores de  $f_{cm, cubo}$  aos 28 dias e no dia de ensaio (provetes  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ ). Só a incorporação de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  parece produzir alguns efeitos positivos nos valores de resistência à compressão. Os valores de  $E_c$  são os que revelam melhor o efeito positivo das nanopartículas. Nota-se, ainda, que a série 550 é a que melhor evidencia os potenciais ganhos da incorporação das nanopartículas, sendo esta a única que apresenta ganhos na resistência à tração ( $f_{ctm}$ ).

Do Quadro 5.11 constata-se que a incorporação de nanopartículas, embora aumente o valor de  $f_{ctm, fl}$ , reduz os valores das resistências residuais finais ( $f_{Rm3}$  e  $f_{Rm4}$ ), mais importantes para a resistência em elementos estruturais (corte e flexão).

## 5.5. Ensaios das Vigas ao Corte e à Flexão

### 5.5.1. Apresentação

Uma análise experimental sobre o comportamento estrutural de um dado elemento passa pela observação e quantificação dos efeitos resultantes da aplicação de ações previstas, definidas inicialmente. Registrando determinados parâmetros como, por exemplo, as reações nos apoios, os deslocamentos e as extensões em certas secções críticas do elemento, podem quantificar-se os efeitos resultantes das ações impostas. Além disso, é também importante analisar os mecanismos de rotura e de fendilhação.

O programa experimental pode ser dividido em duas partes:

- ensaios de vigas sob o efeito do esforço transversal (corte);
- ensaios de vigas sob o efeito da flexão.

Foram ensaiadas até à rotura um total de dezasseis vigas (de betão normal e nanobetão, com e sem fibras): oito vigas para a primeira série (corte) e oito vigas para a segunda série (flexão).

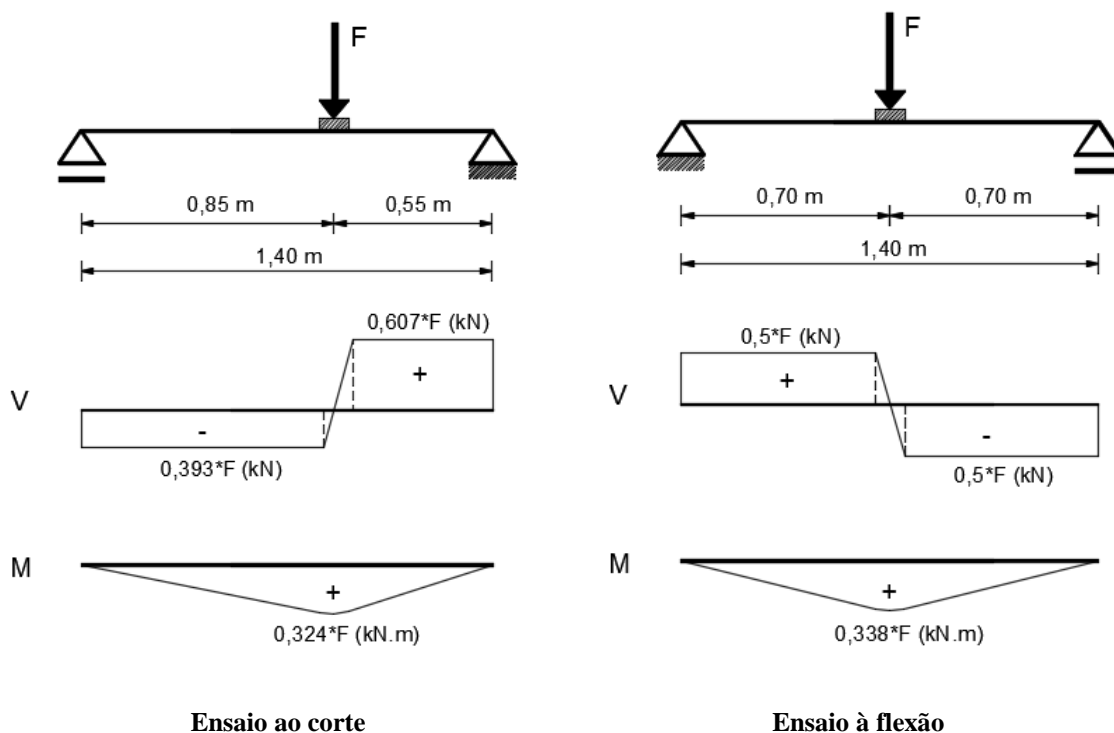


Todas as vigas, sem exceção, têm, como valores médios: 1,55 m de comprimento, 0,12 m de largura e 0,24 m de altura.

Alerta-se para o facto de poderem existir pequenos desvios geométricos, que no entanto serão contabilizados nos cálculos posteriores. Teve-se um especial cuidado em garantir a regularização das superfícies, evitando potenciais e indesejadas concentrações de tensões. Tal foi conseguido através da colocação de uma camada de 5 mm de *K-line* sobreposta por duas placas de aço retangulares de 20 mm de espessura (na zona de aplicação de carga).

As vigas, simplesmente apoiadas nas extremidades, foram carregadas com uma força  $F$  num ponto concentrado a 0,85 m do apoio mais afastado e a meio vão para a situação de análise de esforço transversal e de flexão, respetivamente (Figura 5.17).

Previne-se que a forma dos diagramas está relacionada com a inclusão das já mencionadas placas de apoio, por forma a simplificar, posteriormente, a análise de resultados (Capítulo 6).



**Figura 5.17 – Esquema de ensaio e diagramas de esforços**

Durante os ensaios foram medidos, além dos valores das forças e dos deslocamentos do atuador: os valores das reações nos dois apoios, os deslocamentos verticais (nos ensaios de corte e de flexão) e os deslocamentos horizontais na zona central (apenas nos ensaios de flexão).

Houve ainda um especial cuidado em registar em fotografia todos os ensaios, incluindo o padrão, origem, abertura e evolução das fendas, no sentido de permitir uma perceção adequada do comportamento das vigas. Efetivamente, para o caso dos ensaios de corte, foram pintadas, nas vigas, malhas de círculos com 5 mm de diâmetro espaçados de 15 mm e foi feita uma monitorização por fotogrametria para tratamento futuro (não sendo relevante para esta dissertação a sua apresentação).

### 5.5.2. Descrição das Vigas

As vigas para ensaio ao corte e as vigas para ensaio à flexão (oito + oito vigas) foram denominadas conforme se apresenta no Quadro 5.12, sendo que cada viga está associada a uma amassadura diferente, ou seja, os tipos de betão (*i.e.* misturas) variam.

Na verdade, ambas as séries das vigas são ensaiadas à flexão, só que numa série está prevista que a rotura ocorra por corte e na outra que ocorra por flexão, e mais concretamente por esmagamento do betão comprimido (por forma a notar-se o efeito dos vários tipos de betão).

**Quadro 5.12 – Identificação das vigas**

Betão	Viga	
	Corte	Flexão
<b>350</b>	V1c_350	V1f_350
<b>350Si2%</b>	V2c_350Si2%	V2f_350Si2%
<b>350Al2%</b>	V3c_350Al2%	V3f_350Al2%
<b>550</b>	V4c_550	V4f_550
<b>550Si2%</b>	V5c_550Si2%	V5f_550Si2%
<b>550Al2%</b>	V6c_550Al2%	V6f_550Al2%
<b>550F0,5</b>	V7c_550F0,5	V7f_550F0,5
<b>550Al2%F0,5</b>	V8c_550Al2%F0,5	V8f_550Al2%F0,5

A identificação procede-se da seguinte forma:

- V – viga;
- 1,2,3, ... – número da viga;
- c – para ensaio ao corte;
- f – para ensaio à flexão;
- 350, 350Si2%, ... - tipo de amassadura.

### 5.5.2.1. Armaduras das Vigas para o Ensaio ao Corte

As vigas para ensaio ao corte são constituídas por uma armadura longitudinal de tração composta por quatro varões  $\varnothing 16 \text{ mm}$  ( $A_s = 8,04 \text{ cm}^2$  e  $\rho = 3,42 \%$ ), uma armadura longitudinal da zona comprimida composta por dois varões  $\varnothing 6 \text{ mm}$  ( $A_s' = 8,04 \text{ cm}^2$  e  $\rho' = 0,24 \%$ ) e por uma armadura transversal composta por estribos  $\varnothing 8 \text{ mm}$  afastados  $0,05 \text{ m}$  em toda a extensão, excetuando a zona de estudo do esforço transversal - não foi considerada a colocação de armadura transversal (*i.e.* estribos) em cerca de 45 % da extensão da viga, de modo a garantir um tipo de rotura por corte.

Adotou-se um recobrimento de  $0,02 \text{ m}$ , garantido por espaçadores especialmente indicados para o efeito. Além disso, na idealização das vigas foi tida em conta a aplicação da carga a uma distância superior a  $2 \times d$  ( $d$  - altura útil) da extremidade mais próxima, para evitar a criação de uma biela diretamente para o apoio, pretendendo-se assim assegurar que o betão esteja sujeito ao esforço transversal (Lima *et al*, 1989; NP EN 1992-1-1, 2010)

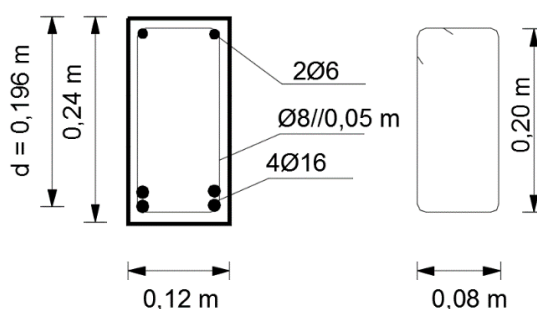


Figura 5.18 – Corte transversal de viga-tipo – ensaio ao corte

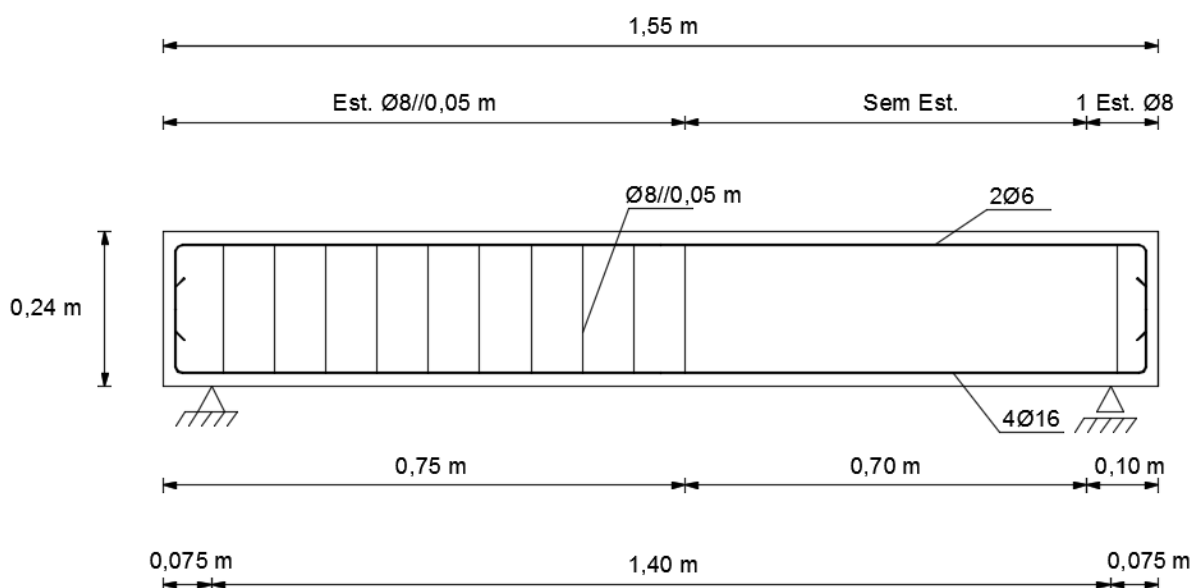


Figura 5.19 – Corte longitudinal de viga-tipo – ensaio ao corte

As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam um corte transversal e longitudinal, respetivamente, das armaduras de uma viga-tipo para o ensaio ao corte, que se considera representativa desta série de ensaios. Nestas figuras estão ainda definidas as dimensões médias e a pormenorização das armaduras.

### 5.5.2.2. Armaduras das Vigas para o Ensaio à Flexão

As armaduras das vigas para ensaio à flexão são semelhantes às das vigas para ensaio ao corte, estando os estribos, neste caso, dispostos em toda a extensão da viga. Assim, as vigas são constituídas por uma armadura longitudinal de tração composta por quatro varões  $\varnothing 16$  mm ( $A_s = 8,04 \text{ cm}^2$  e  $\rho = 3,42 \%$ ), uma armadura longitudinal da zona comprimida composta por dois varões  $\varnothing 6$  mm ( $A_s' = 8,04 \text{ cm}^2$  e  $\rho' = 0,24 \%$ ) e por uma armadura transversal composta por estribos  $\varnothing 8$  mm afastados  $0,05 \text{ m}$ , ao longo de toda a extensão longitudinal da viga. Adotou-se, igualmente, um recobrimento de  $0,02 \text{ m}$ .

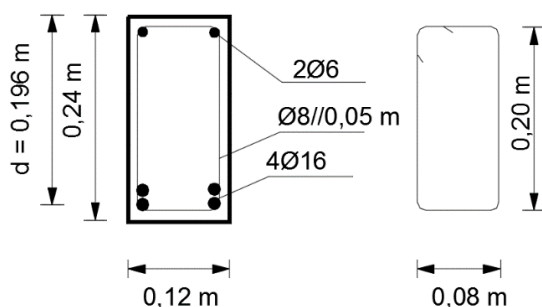


Figura 5.20 – Corte transversal de viga-tipo – ensaio à flexão

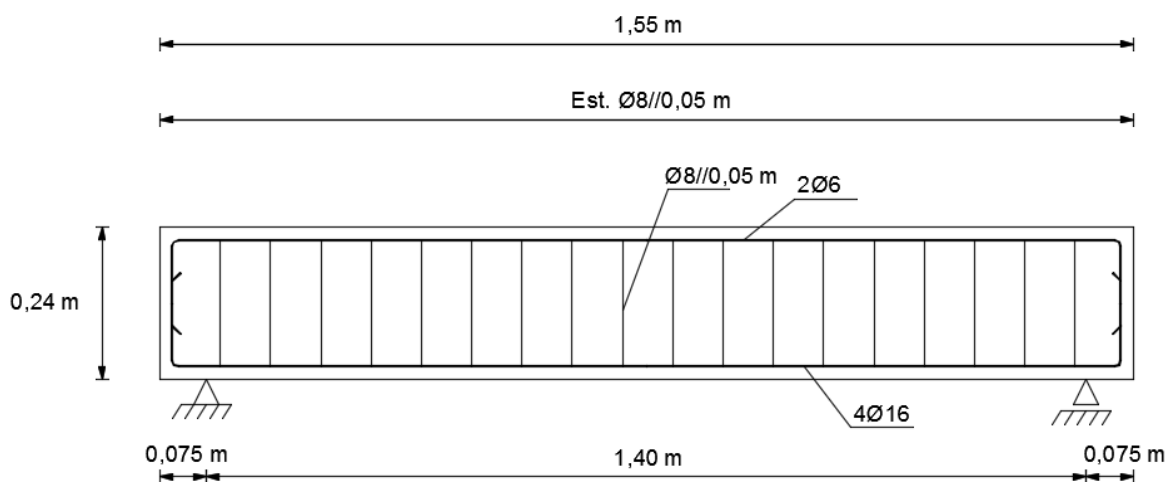


Figura 5.21 – Corte longitudinal de viga-tipo - ensaio à flexão

As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam um corte transversal e longitudinal, respetivamente, das armaduras de uma viga-tipo para o ensaio à flexão, que se considera representativa desta série de ensaios. Nestas figuras estão ainda definidas as dimensões médias e a pormenorização das armaduras.

### 5.5.2.3. Produção das Vigas

Antes da betonagem foi necessário conceber o sistema de cofragem a ser utilizado (Figura 5.22). Tendo em conta que as vigas para ensaio ao corte e flexão seriam de iguais dimensões e por forma a garantir uma uniformidade nas misturas, idealizou-se um sistema que permitiu a betonagem simultânea de duas vigas.

Como nota complementar, foram colocados grampos espaçados  $0,2 \times l$  das extremidades das vigas por forma a facilitar e a evitar problemas na descofragem da viga.

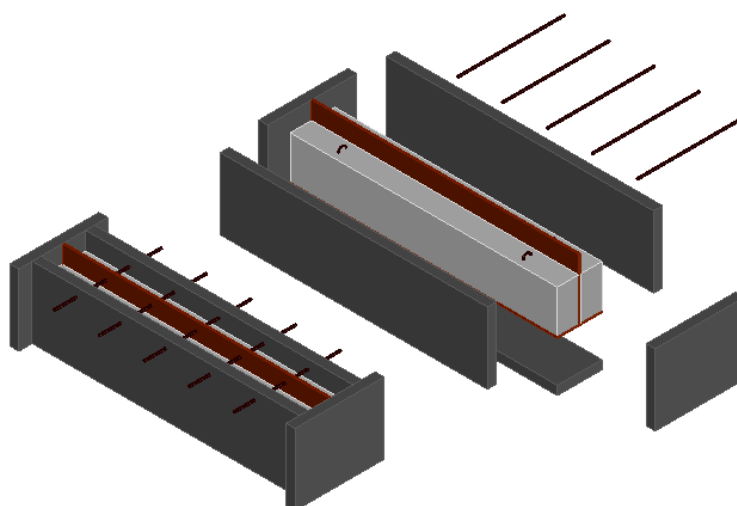


Figura 5.22 – Esquema da cofragem das vigas em CAD®

O processo de produção das vigas pode ser estruturado nos seguintes passos:

**Passo 1:** Preparação da cofragem metálica, dividida verticalmente ao longo do eixo com uma placa de aglomerado (em madeira), com revestimento num dos topos e na base com o mesmo material, colocação das armaduras, com espaçadores, e escoramento das cofragens (Figura 5.23).



**Figura 5.23 – Cofragem metálica e armaduras**

**Passo 2:** Realização das amassaduras (ver Quadros 5.1 a 5.3 no Subcapítulo 5.2.1) numa misturadora de eixo vertical (90 litros), por duas vezes (65 litros + 65 litros), devido a limitação da capacidade (Figura 5.24).



**Figura 5.24 – Execução de amassaduras**

**Passo 3:** Betonagem horizontal, e com recurso a vibrador, das vigas (Figura 5.25).

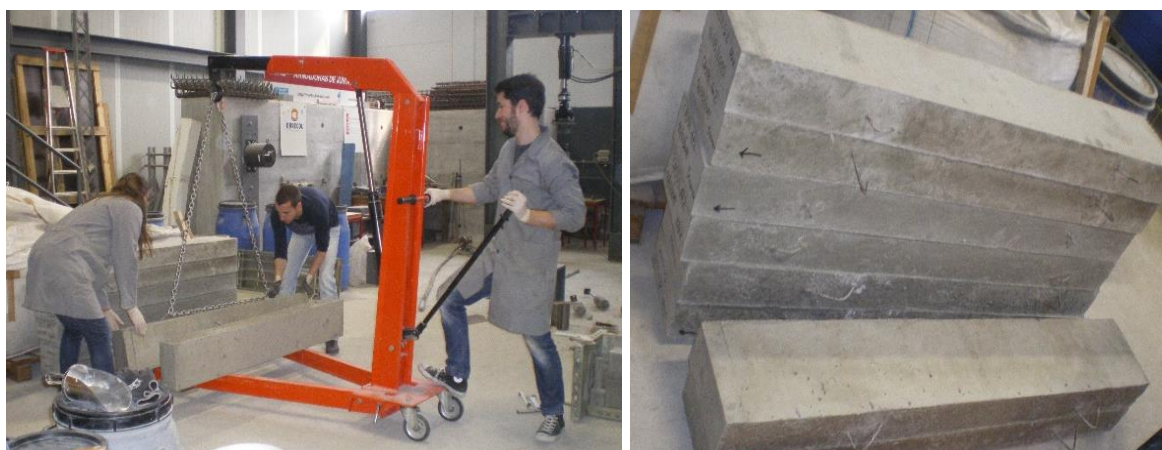


**Passo 4:** Cura em ambiente, aproximadamente, a 20 °C de temperatura e 60 % de humidade relativa durante 24 horas (Figura 5.25).



**Figura 5.25 – Betonagem (com vibração) e cura das vigas**

**Passo 4:** Descofragem, identificação das vigas e cura prolongada durante um período superior a 28 dias (Figura 5.26).



**Figura 5.26 – Descofragem e cura prolongada das vigas**

### 5.5.3. Descrição dos Ensaios e Instrumentação

Utilizou-se um pórtico de reação para os ensaios de carga, formado por dois pilares e duas vigas, em perfis metálicos (*HE-B 300*) ligados por parafusos, formando um conjunto resistente capaz de reduzir as deformações sofridas na aplicação de carga (Figura 5.27).



**Figura 5.27 - Pórtico de ensaio**

Cada viga ensaiada foi assente em dois apoios cilíndricos, com liberdade de rotação portanto, colocados simetricamente em relação ao eixo da viga e distanciados entre si 1,40 m. Os mesmos abrangem toda a largura da viga. Debaixo destes apoios foram colocadas as células de carga, que foram fixas à viga de apoio. A viga metálica de apoio foi fixa à laje de reação e permitiu a transmissão das cargas para esta.

Efetivamente, a viga de ensaio funcionou, estruturalmente, como uma viga simplesmente apoiada, em que o carregamento aplicado correspondeu a uma força concentrada vertical, aplicada em zonas diferentes, conforme o tipo de ensaio (corte ou flexão).

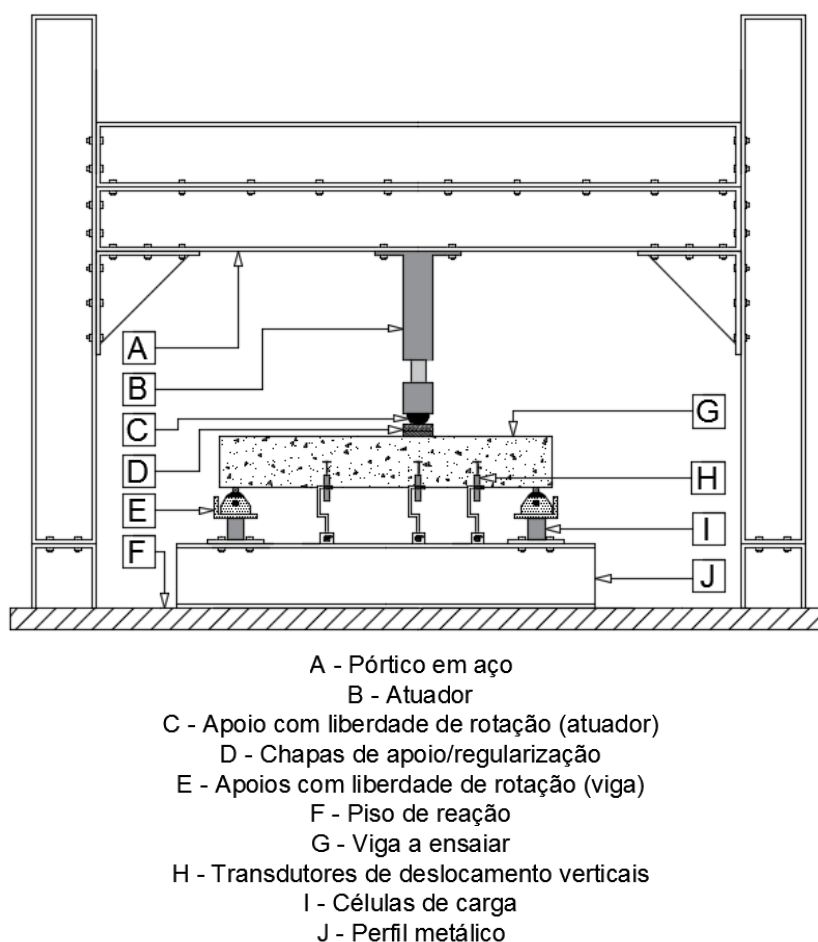
O atuador, como já se mencionou, não esteve em contacto direto com as vigas - existiu uma camada de *K-line* sobre a qual foram colocadas ainda duas placas de aço de 100×100×20 mm<sup>3</sup>.



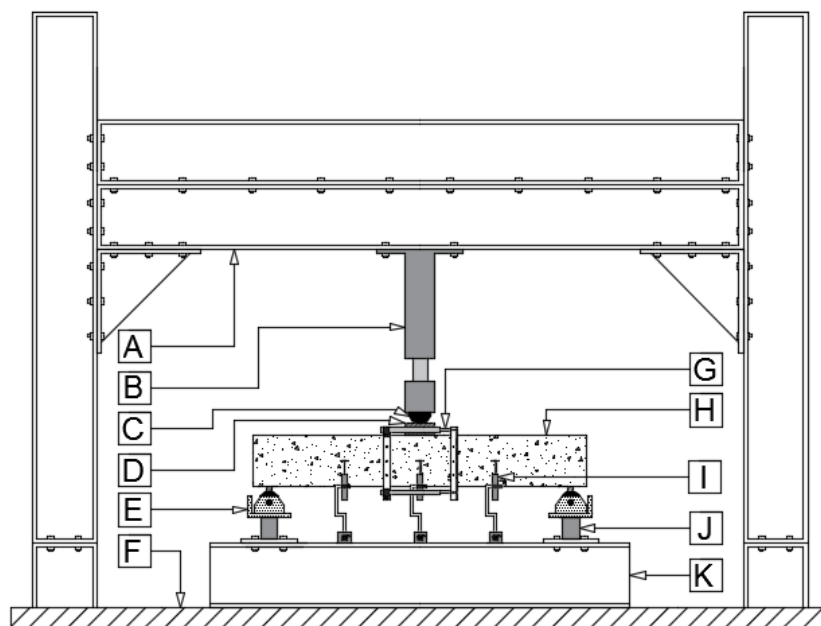
A carga principal foi transmitida através de um atuador hidráulico, fixo ao pórtico de ensaio, de capacidade máxima, à compressão, de 300 *kN*. O atuador possui um transdutor interno de deslocamento e uma célula de carga, como instrumentos de medição e controlo. A aplicação da carga foi controlada por computador, através de um *software* de controlo e aquisição de dados, podendo ser definidas, entre outras variáveis, o tipo e a velocidade da carga. Este sistema permite aplicar as ações usando controlo de força ou deslocamento.

No trabalho experimental a carga foi sempre aplicada por controlo de deslocamento, com uma velocidade de 0,02 *mm/s*. Uma grande vantagem deste sistema é permitir paragens na aplicação da carga, sem parar a aquisição de dados. Mas a razão principal para a escolha da aplicação da ação por controlo de deslocamento é o de esta permitir obter a resposta “*pós-pico*”, altamente pertinente para posterior análise de dados.

Nas Figuras 5.28 e 5.29 apresenta-se esquematicamente o pórtico de ensaio, com as vigas de ensaio ao corte e flexão, e os instrumentos de medição.



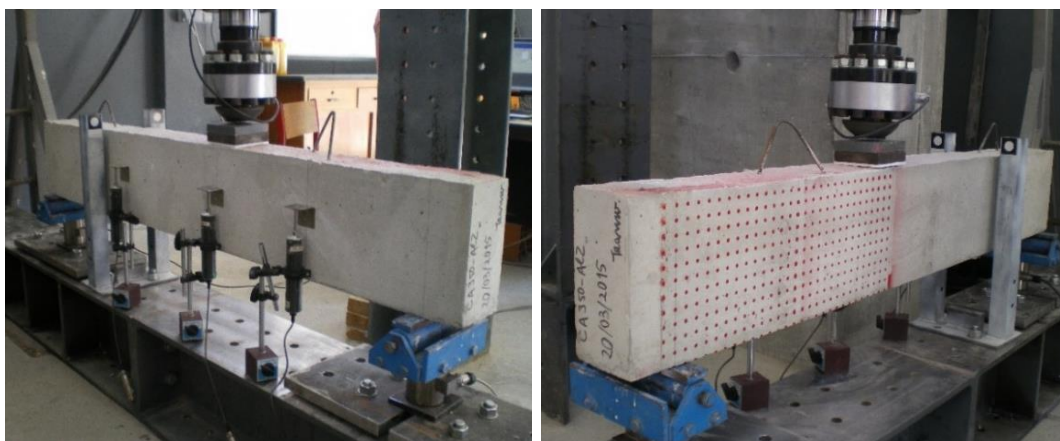
**Figura 5.28 - Esquema do pórtico de ensaio – ensaio ao corte**



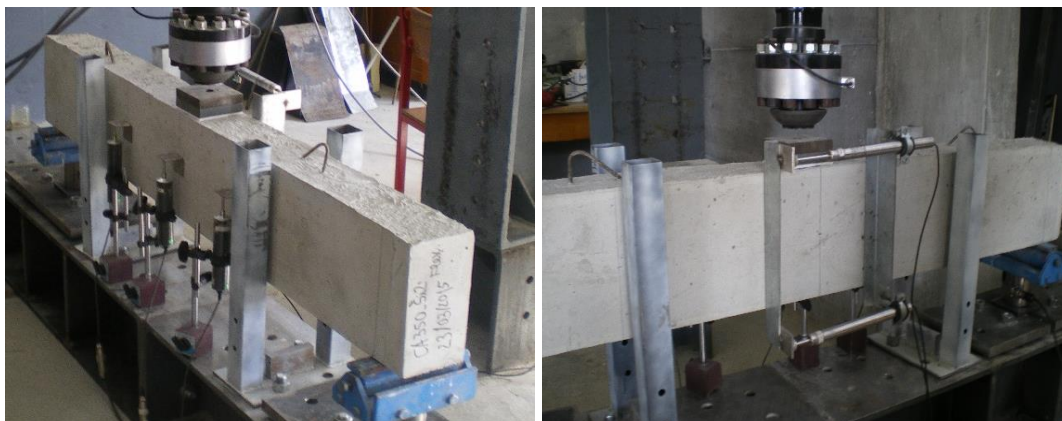
- A - Pórtico em aço
- B - Atuador
- C - Apoio com liberdade de rotação (atuador)
- D - Chapas de apoio/regularização
- E - Apoios com liberdade de rotação (viga)
- F - Piso de reação
- G - Transdutores de deslocamento horizontais
- H - Viga a ensaiar
- I - Transdutores de deslocamento verticais
- J - Células de carga
- K - Perfil metálico

**Figura 5.29 - Esquema do pórtico de ensaio – ensaio à flexão**

Nas Figuras 5.30 e 5.31 apresentam-se fotografias de vigas para ensaio ao corte e flexão, respectivamente, já preparadas para a realização do ensaio, com todos os equipamentos de instrumentação.



**Figura 5.30 – Viga preparada para ensaio – ensaio ao corte**



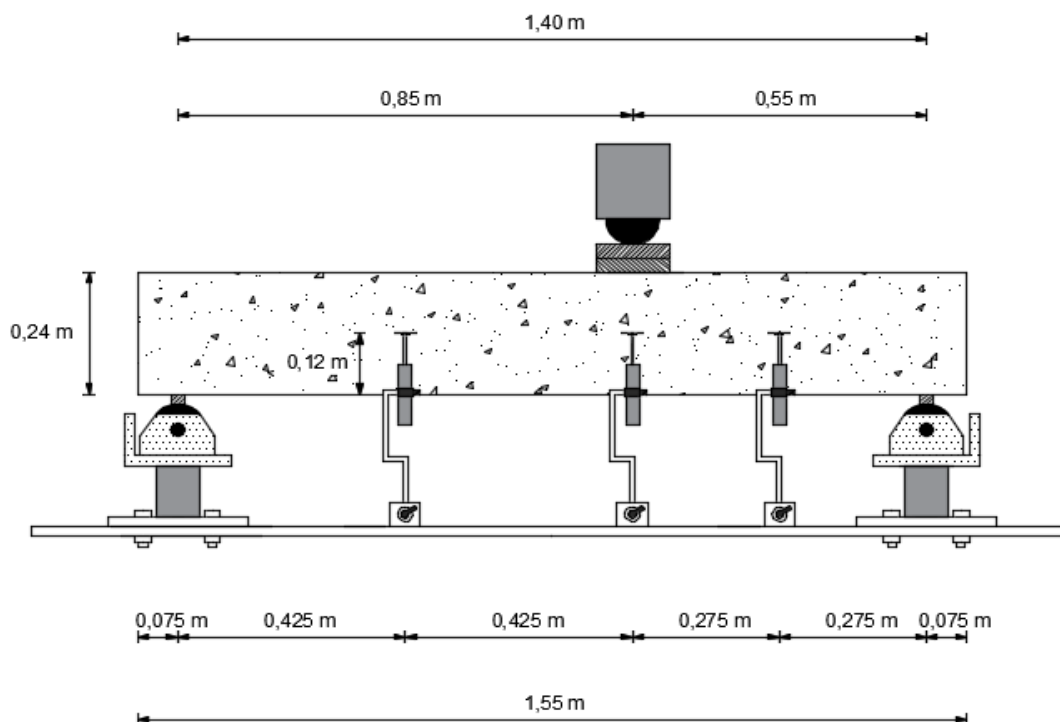
**Figura 5.31 - Viga preparada para ensaio – ensaio à flexão**

Antes da realização dos ensaios, e após a montagem das vigas no pórtico, foram feitas as medições rigorosas dos seguintes parâmetros: largura da secção, altura média da secção na zona de aplicação da carga, comprimento total das vigas, distância entre os apoios, distâncias dos transdutores de deslocamento horizontais relativamente às faces superior e inferior das vigas e distâncias da zona de medição desses transdutores. Os valores medidos encontram-se resumidos no Anexo A, consoante o esquema apresentado no mesmo.

A instrumentação foi sempre exterior, para ambos os tipos de ensaio (corte e flexão), e englobou os seguintes equipamentos: transdutores de deslocamento (LVDTs), verticais e horizontais, e células de carga.

Em relação aos transdutores de deslocamento, convém analisar o sistema utilizado no ensaio ao corte em separado do sistema utilizado no ensaio à flexão, uma vez que os dados recolhidos são diferentes e o comportamento também.

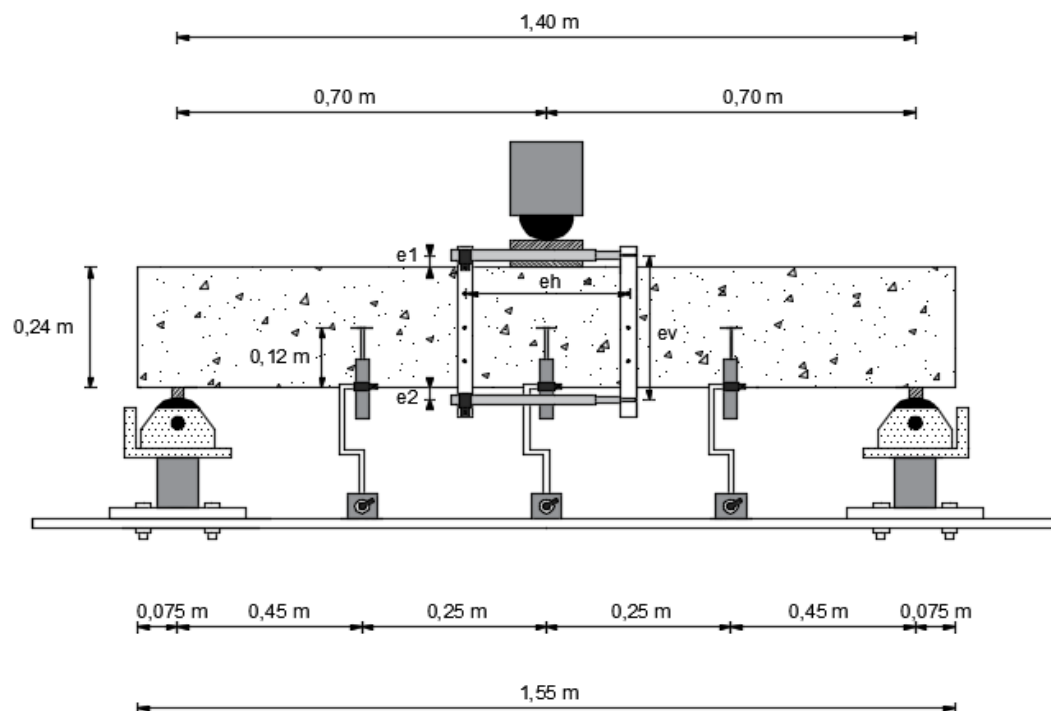
No caso das vigas de ensaio ao corte (ver Figura 5.32), para medir os deslocamentos verticais, em relação a um referencial fixo, foram colocados três transdutores de deslocamento, com curso máximo de 50 mm, fixos com suportes magnéticos ao perfil metálico da base, apoiado na laje de reação. As leituras dos deslocamentos foram realizadas ao nível do eixo das vigas, recorrendo-se para isso a pequenas cantoneiras. Na disposição destes transdutores de deslocamento procurou-se diminuir o risco dos instrumentos ficarem danificados na fase de rotura da viga. Os pontos escolhidos para medir os deslocamentos verticais foram: a secção diretamente sob o ponto de aplicação do atuador (a 0,85 m do apoio mais afastado), a secção a meia distância entre o atuador e o apoio da face mais próxima (0,275 m) e a secção a meia distância entre o atuador e o apoio da face mais afastada (0,425 m).



**Figura 5.32 – Esquema detalhado do equipamento de ensaio – ensaio ao corte**

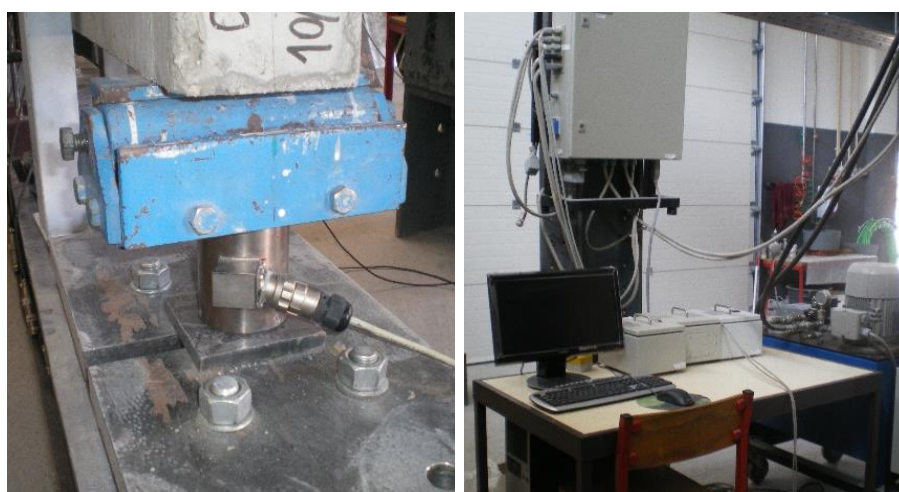
No caso das vigas de ensaio à flexão (ver Figura 5.33), para medir os deslocamentos verticais, também foram colocados três transdutores de deslocamento, com curso máximo de 50 *mm* e fixos com bases magnéticas ao perfil metálico. Os pontos escolhidos para medir os deslocamentos verticais foram: a seção a meio vão da viga e as seções a uma distância do ponto de aplicação do atuador, para os dois lados, de 0,25 *m* (uma vez que, para a colocação de guardas de segurança, não foi possível colocar a meia distância entre o atuador e os apoios, como se tinha previsto inicialmente). Além disso, do lado oposto da viga, com a finalidade de medir as extensões de encurtamento e de alongamento sofridas pela zona central da viga, foram utilizados dois transdutores de deslocamento (curso máximo de 100 *mm*), colocados na horizontal, nessa mesma zona. Tal foi materializado pelo aparafusamento de duas cantoneiras lateralmente à viga e dispostas na vertical, de forma simétrica em relação à secção central, com uma amplitude média de 0,24 *m* (igual à altura da viga), para que a rotura ocorresse dentro da zona de leitura. Numa das cantoneiras concebeu-se um sistema que permitia a fixação dos transdutores de deslocamento, com capacidade de rotação para que estes se mantivessem horizontais durante a deformação da viga. Na outra cantoneira colaram-se anéis metálicos que permitiam o encaixe das ponteiros dos transdutores de deslocamento, sem restringir a sua capacidade de rotação.

Alerta-se apenas, por razões de simplificação, para a esquematização dos LVDTs verticais e horizontais na mesma face da viga na Figura 5.33 (tal como se fez na Figura 5.29), sendo que na realidade estavam em faces opostas da viga.



**Figura 5.33 – Esquema detalhado do equipamento de ensaio – ensaio à flexão**

As células de carga (200 kN de capacidade), quer para os ensaios de corte quer para os de flexão, foram colocadas na base de cada apoio das vigas (Figura 5.34), por forma a medir as reações nos apoios. Por outro lado, para a aquisição de dados, ao longo do procedimento experimental foi utilizado um *software* informático denominado *Dynatester*, instalado num computador dedicado exclusivamente para a realização de ensaios experimentais (Figura 5.34) e que permite não só recolher toda a informação dos testes laboratoriais como efetuar o controlo da aplicação de carga. Desta forma, garantiu-se a máxima fiabilidade do processo.



**Figura 5.34 - Célula de carga e equipamento de controlo e aquisição de dados**



## Capítulo 6 – Análise de Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios experimentais. Alguns destes resultados foram devidamente analisados e processados para facilitar a interpretação do comportamento estrutural das vigas ensaiadas.

Este capítulo está dividido, essencialmente, em duas partes principais:

- análise do comportamento ao corte;
- análise do comportamento à flexão.

O principal objetivo é o de analisar se existem ou não benefícios na resistência das vigas ao corte e à flexão com a incorporação de nanopartículas.

### 6.1. Análise do Comportamento ao Corte

#### 6.1.1. Relação Carga - Deslocamento

Neste subcapítulo sobre o efeito do esforço transversal, apresentam-se os diagramas de carga ( $F$ ) – deslocamento ( $\delta$ ), obtidos experimentalmente, para cada uma das oito vigas ensaiadas.

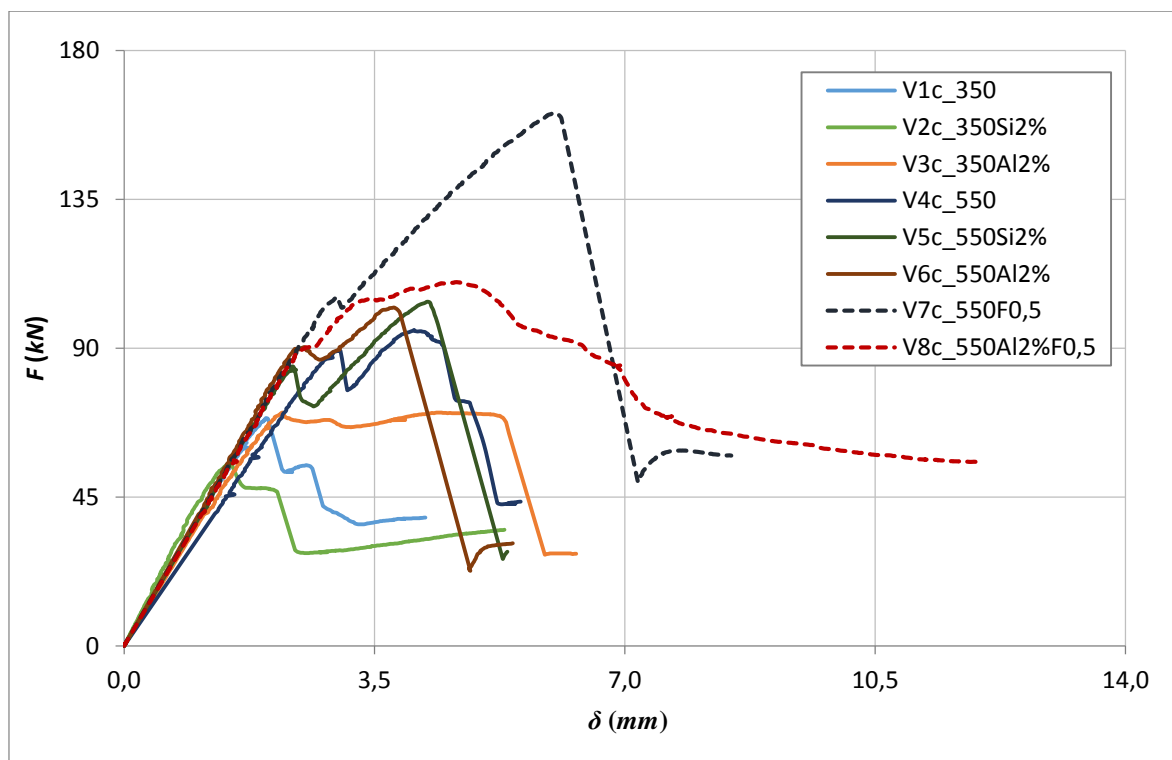
As curvas  $F$ - $\delta$  obtiveram-se diretamente dos valores medidos pela instrumentação, nomeadamente ao nível da aplicação da carga ( $F$  foi medido por uma célula de carga alocada no atuador) e da flecha a 0,85 m do apoio mais distante da viga ( $\delta$  foi medido diretamente através de um LVDT colocado na secção sob o atuador).

Os valores de deslocamento utilizados (quer neste caso, quer no caso da flexão) foram os medidos recorrendo a um LVDT vertical e não os registados pelo atuador, uma vez que este último regista os deslocamentos contabilizando não só a deformação da viga ensaiada, mas também a deformação do pórtico de reação.

Os resultados das vigas apresentados na Figura 6.1 permitem analisar a forma como evoluíram as flechas das vigas em função do carregamento imposto. No Anexo B apresentam-se os resultados divididos por séries (série 350 e série 550), para melhor evidenciar as diferenças de comportamento entre as vigas da mesma série.

Refere-se que foi feito um ligeiro ajuste (tendência linear) do troço inicial ascendente, por forma a colmatar desvios relacionados com o contacto do atuador com as vigas.

A relação carga-deslocamento é uma das mais importantes numa análise de resultados, pois permite uma observação rápida e eficaz do comportamento dos elementos.



**Figura 6.1 - Diagramas carga-deslocamento das vigas de ensaio ao corte**

No Quadro 6.1 apresentam-se os valores referentes à carga que origina a primeira fenda de corte ( $F_{1^{a}fenda}$ ), à carga máxima ( $F_{máx}$ ) (*i.e.* máximo valor de força suportado pelas vigas) e ao deslocamento máximo ( $\delta_{máx}$ ) para as oito vigas.

**Quadro 6.1 – Valores de carga e flecha do ensaio ao corte**

Viga	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$F_{1^{a}fenda}$ (kN)	$F_{máx}$ (kN)	$\delta_{máx}$ (mm)
V1c_350	32,1	68,84	68,84	1,98
V2c_350Si2%	34,6	55,21	55,21	1,48
V3c_350Al2%	32,1	70,56	70,56	2,21
V4c_550	59,3	89,14	95,53	4,05
V5c_550Si2%	59,3	84,42	104,05	4,24
V6c_550Al2%	58,2	90,31	102,28	3,77
V7c_550F0,5	63,2	105,29	161,15	6,02
V8c_550Al2%F0,5	62,8	105,13	109,97	4,65

Da observação dos diagramas e do quadro exibidos (Figura 6.1 e Quadro 6.1), podem-se tecer alguns comentários.



Em primeiro lugar, os diagramas apresentam um troço ascendente linear (embora corrigido) até ao início da fendilhação, com uma inclinação que é semelhante para as vigas da mesma série, com a exceção da viga V4c\_550.

Em segundo lugar, é visível, para todas as vigas, o aparecimento da primeira fenda de corte, através de uma quebra da força suportada. Na série 350, pode-se observar que a viga onde primeiro apareceu a fenda foi a V2c\_350Si2%, seguida da V1c\_350 e da V3c\_350Al2%, existindo uma diferença de 2,5 % entre os valores de  $F_{1^{a}fenda}$  destas duas últimas. Compare-se, agora, com os valores da resistência à compressão ( $f_{cm,cil}$ ), que estarão diretamente relacionados com a resistência ao esforço transversal: embora as vigas V1c\_350 e V3c\_350Al2% tenham a mesma resistência, e que se parece coadunar com os valores da força correspondentes à primeira fenda de corte, considerando o mesmo raciocínio, a viga V2c\_350Si2% deveria apresentar uma força superior. Tal poderá dever-se a dispersões nos ensaios de caracterização. Na série 550, as tendências parecem manter-se, na primeira fenda: a viga V5c\_550Si2% apresenta o valor de força mais baixo e as vigas V4c\_550 e V6c\_550Al2% os valores mais altos, embora semelhantes entre si (diferença de cerca de 1 %). Evidentemente, era expectável que as vigas com fibras (V7c\_550F0,5 e V8c\_550Al2%F0,5) induzissem um aumento na força necessária para o aparecimento da primeira fenda, tal como foi visto no Capítulo 4. Tal é verificável nos diagramas e esse comportamento coincide também com a evolução das resistências à compressão. Todavia, a incorporação de 2 % de nanopartículas de  $Al_2O_3$  parece ter um efeito negativo quando combinada com o uso de fibras de aço. É, ainda, visível um efeito menos evidente da fenda de corte inicial nas vigas com fibras. Isso prende-se, essencialmente, com a capacidade de transmissão das tensões de tração das fibras (também responsável pelo aumento da força da primeira fenda) que impede uma abertura brusca das fendas.

Em terceiro lugar, as forças máximas traduzem, no geral, a representação das primeiras fendas de corte (embora seja mais fácil perceber as diferenças), com uma exceção, a da viga V5c\_550Si2%, que apresentou uma força máxima superior às das vigas V4c\_550 e V6c\_550Al2%. Consegue-se constatar uma diferença pertinente entre as séries 350 e 550: na primeira, o valor de  $F_{máx}$  corresponde ao de  $F_{1^{a}fenda}$ ; na segunda, o valor de  $F_{máx}$  é superior ao de  $F_{1^{a}fenda}$ . Na verdade, o pico dos diagramas coincide com a rotura das vigas por corte, que ocorre com o desenvolvimento das fendas até ao bordo superior, dividindo-as em duas.

Alerta-se para o facto da viga V3c\_350Al2% não evidenciar um comportamento no “*pós-pico*” semelhante ao das restantes vigas.

## 6.1.2. Análise dos Valores de Esforço Transverso

### 6.1.2.1. Esforço Transverso Teórico

O cálculo teórico da resistência ao esforço transversal ( $V_{teo}$ ), nas vigas, permite fazer uma previsão dos valores experimentais e uma posterior comparação com estes.

Refere-se, antes de avançar para os cálculos, que os valores característicos (*e.g.*  $f_{ck}$ ), usualmente propostos pelos regulamentos, foram sempre substituídos pelos valores médios (*e.g.*  $f_{cm,cil}$ ), uma vez que tal se adequa melhor a uma comparação com a análise experimental.

### ***V<sub>teo</sub> – Vigas sem fibras***

O valor de cálculo do esforço transversal resistente ( $V_{teo}$ ) das vigas V1c\_350, V2c\_350Si2%, V3c\_350Al2%, V4c\_550, V5c\_550Si2% e V6c\_550Al2% foi determinado utilizando a expressão para elementos sem armadura de esforço transversal, constante no EC2 (Expressão 6.1).

$$V_{teo}(kN) = [C_{Rd,c} \times k \times (100 \times \rho_l \times f_{cm,cil})^{\frac{1}{3}} + k_1 \times \sigma_{cp}] \times bw \times d \quad (6.1)$$

*Legenda:*  $C_{Rd,c}$ ,  $k$  e  $k_1$  – coeficientes (EC2);  $\rho_l$  – taxa de armadura longitudinal;  $f_{cm,cil}$  – valor médio da tensão de rotura do betão à compressão (cilindros) (MPa);  $\sigma_{cp}$  – tensão de compressão no betão devida a um esforço normal ou pré-esforço (MPa);  $bw$  – menor largura da seção transversal na área tracionada (igual a  $b$ ) (mm);  $d$  – altura útil da seção (mm).

### ***V<sub>teo</sub> – Vigas com fibras***

O cálculo do  $V_{teo}$  das vigas V7c\_550F0,5 e V8c\_550Al2%F0,5 foi feito tendo em conta a recomendação RILEM TC 162-TDF, que se baseia no EC2, como já se mencionou. Assim, a resistência ao esforço transversal teórico é determinada pela seguinte expressão:

$$V_{teo}(kN) = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd} \quad (6.2)$$

Com as seguintes componentes:

- contributo do betão

$$V_{cd}(kN) = [C_{Rd,c} \times k \times (100 \times \rho_l \times f_{cm,cil})^{\frac{1}{3}} + k_1 \times \sigma_{cp}] \times bw \times d \quad (6.3)$$

e é calculado da mesma forma que  $V_{teo}$  dos elementos sem fibras;

- contributo das fibras

$$V_{fd}(kN) = 0,7 \times k_f \times k_1 \times \tau_{fd} \times b_w \times d \quad (6.4)$$

em que,

$$\tau_{fd}(MPa) = 0,12 \times f_{Rm4} \quad (6.5)$$

- contributo dos estribos

$$V_{wd}(kN) = 0 \quad (6.6)$$

, uma vez que não existem estribos na zona de rotura.

*Legenda:*  $k_f$ - fator que tem em conta contributo dos banzos nas seções em T;  $\tau_{fd}$  – valor de dimensionamento relativo ao aumento da resistência ao corte devido às fibras (MPa);  $f_{Rm4}$  – valor médio da resistência residual à tração por flexão para uma flecha central de 3,02 mm (MPa).

Todos os procedimentos e expressões de cálculo utilizados (incluindo dos cálculos intermédios), para determinar o  $V_{teo}$  das vigas sem fibras e com fibras, apresentam-se em pormenor no Anexo C.

Os valores de  $V_{teo}$  estão resumidos no Quadro 6.2. Nesse quadro, também se apresentam os valores da relação entre o  $V_{teo}$  da viga e o  $V_{teo}$  da viga de referência (V1c\_350 para a série 350 e V4c\_550 para a série 550).

**Quadro 6.2 – Valores teóricos do esforço transversal**

Viga	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$V_{teo}$ (kN)	$V_{teo} / V_{teo,ref}$	
			Série 350	Série 550
V1c_350	32,1	23,25	1,00	---
V2c_350Si2%	34,6	23,30	1,00	---
V3c_350Al2%	32,1	22,41	0,96	---
V4c_550	59,3	28,41	---	1,00
V5c_550Si2%	59,3	28,16	---	0,99
V6c_550Al2%	58,2	28,46	---	1,00
V7c_550F0,5	63,2	33,94	---	1,19
V8c_550Al2%F0,5	62,8	31,96	---	1,12

Nas vigas sem fibras, o esforço transversal tem uma relação proporcionalmente direta com a resistência à compressão, uma vez que as vigas têm todas as mesmas dimensões, aproximadamente. Nas vigas com fibras, o esforço transversal depende do contributo das fibras, que é contabilizado por duas vias: através de um aumento na resistência à compressão e através de uma componente de cálculo (*i.e.*  $V_{fd}$ ).

Na passagem da série 350 para a série 550, sem fibras, estima-se um aumento da resistência ao esforço transversal a variar entre 21 e 27 %.

O Quadro 6.2 permite, além disso, prever a influência das nanopartículas e das fibras na resistência ao esforço transversal: na série 350 verifica-se que as nanopartículas não beneficiarão as misturas, no caso da V3c\_350A12% existirá até uma perda de 4 % em relação à viga de referência; na série 550 não existirá nenhuma alteração no comportamento com a introdução de nanopartículas, exceto na V8c\_550A12%F0,5, onde as nanopartículas parecem prejudicar a resistência, na sua relação com as fibras. Por outro lado, a V7c\_550F0,5 demonstra um potencial ganho de 19 % devido à incorporação das fibras.

#### 6.1.2.2. Esforço Transverso Máximo (Experimental)

O esforço transversal máximo experimental ( $V_{m\acute{a}x}$ ) é determinado a partir do diagrama de esforços (na situação de carga máxima) da Figura 5.17 do Subcapítulo 5.5.1 e através da seguinte expressão:

$$V_{m\acute{a}x}(kN) = 0,607 \times F_{m\acute{a}x} \quad (6.7)$$

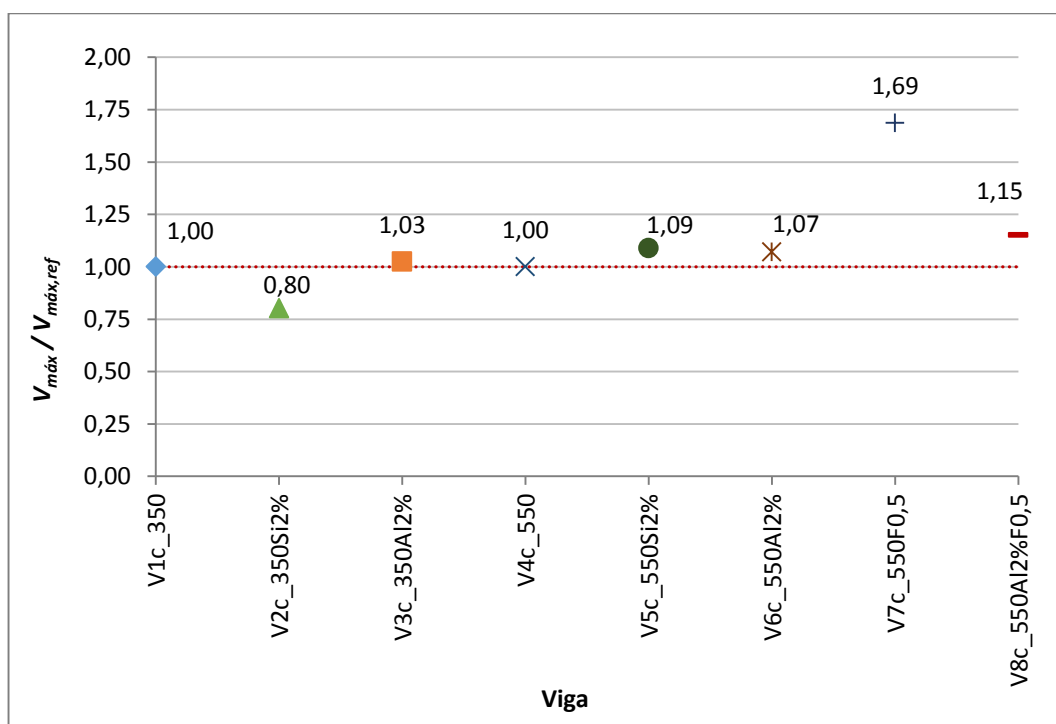
Os valores de  $V_{m\acute{a}x}$  estão resumidos no Quadro 6.3.

**Quadro 6.3 - Valores experimentais do esforço transversal**

Viga	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$V_{m\acute{a}x}$ (kN)	$V_{m\acute{a}x} / V_{m\acute{a}x,ref}$	
			Série 350	Série 550
V1c_350	32,1	41,78	1,00	---
V2c_350Si2%	34,6	33,51	0,80	---
V3c_350A12%	32,1	42,83	1,03	---
V4c_550	59,3	57,98	---	1,00
V5c_550Si2%	59,3	63,16	---	1,09
V6c_550A12%	58,2	62,09	---	1,07
V7c_550F0,5	63,2	97,82	---	1,69
V8c_550A12%F0,5	62,8	66,75	---	1,15

A passagem da série 350 para a série 550 sem fibras revela um aumento da resistência ao esforço transversal a variar entre 39 e 89 %.

O Quadro 6.3 permite analisar, a partir dos dados experimentais, a influência das nanopartículas e das fibras na resistência ao esforço transversal: na série 350 verifica-se que as nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  prejudicam em 20 % a resistência ao esforço transversal e que as nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  têm um benefício reduzido de 2,5 %; no entanto, na série 550 a introdução de nanopartículas parece surtir um efeito positivo de até 9 % na resistência ao corte, só que, mais uma vez, a sua interação com as fibras (V8c\_550Al2%F0,5) traduz-se numa perda comparativamente a uma situação só com fibras (V7c\_550F0,5). No entanto, o uso das fibras revelou-se altamente satisfatório, como era previsível, induzindo um aumento de resistência de cerca de 70 % em relação à viga de referência.



**Figura 6.2 – Relação do esforço transversal máximo (experimental) entre as vigas com nanopartículas e fibras e as vigas de referência**

O Quadro 6.3 e a Figura 6.2 (no qual consta a relação  $V_{máx} / V_{máx,ref}$  em função das misturas utilizadas nas vigas de ensaio ao corte) permitem chegar às mesmas conclusões dos diagramas  $F-\delta$  e servem, essencialmente, para possibilitar uma visualização simples e concisa da informação (no Anexo D consta a relação  $V_{máx} - f_{cm,cil}$ ).

Sumariando, a série 350 apresenta valores de  $V_{máx}$  inferiores à série 550, sendo que as vigas com melhores resultados para cada série foram a V3c\_350Al2% e a V7c\_550F0,5,

respetivamente, enquanto as vigas com piores resultados foram a V2c\_350Si2% e a V4c\_550. Ou seja, os resultados experimentais (*i.e.* os valores de  $V_{m\acute{a}x}$ ) não parecem ter paralelismo com as previsões teóricas (*i.e.* os valores de  $V_{teo}$ ).

A incorporação de nanopartículas parece surtir alguns efeitos positivos (até cerca de 9 % em ganhos), sendo esse mais visível na série 550. Porém, se se tiverem em conta os resultados de ambas séries (350 e 550), verificam-se algumas dispersões, não permitindo concluir claramente se existe uma tendência positiva. Além disso, a incorporação de nanopartículas em mistura com fibras metálicas revela-se prejudicial para a resistência ao esforço transversal.

### 6.1.2.3. Relação $V_{teo} / V_{m\acute{a}x}$

**Quadro 6.4 – Relação entre valores teóricos e experimentais do esforço transversal**

Viga	$V_{teo} / V_{m\acute{a}x}$
V1c_350	0,56
V2c_350Si2%	0,70
V3c_350Al2%	0,52
V4c_550	0,49
V5c_550Si2%	0,45
V6c_550Al2%	0,46
V7c_550F0,5	0,35
V8c_550Al2%F0,5	0,48

Através do Quadro 6.4 constata-se as diferenças entre os valores teóricos e experimentais (que têm uma variação que não é constante), que são, no entanto, comuns neste tipo de análise. De uma forma geral, os valores teóricos deverão ser sempre iguais ou inferiores aos valores experimentais, uma vez que estão relacionados com a resistência. Quanto mais baixa a relação entre os valores teóricos e os valores experimentais, mais conservativo será o modelo de cálculo utilizado. Como nos cálculos foram utilizados valores médios experimentais (e não característicos) a relação devia apresentar um valor próximo de 1,00, no entanto ela apresenta alguma dispersão.

### 6.1.3. Erro na Medição da Carga Aplicada

Com o intuito de estabelecer uma confiança nos valores registados experimentalmente pelos equipamentos de ensaio, que serviram para efetuar os cálculos da análise de dados, fez-se uma breve análise do erro relativo ao valor da carga aplicada.

O erro global, considerando todas as vigas, tem um valor reduzido de 1,29 %, calculado pela Expressão 6.8.

$$Erro (\%) = \left| \frac{\sum F_{atuador} - \sum F_{reações}}{\sum F_{atuador}} \right| \times 100 \quad (6.8)$$

#### 6.1.4. Fendilhação e Tipo de Rotura

Neste subcapítulo efetua-se uma descrição da fendilhação que as vigas nos ensaios de corte exibiram ao longo do ensaio. Esta análise pode, à partida, parecer pouco significativa, contudo a observação da fendilhação pode indicar alguns aspetos relevantes sobre o comportamento das vigas.

Apresentam-se os padrões de fendilhação das vigas de ensaio ao corte, no instante imediatamente após o aparecimento da primeira fenda, na zona entre o ponto de aplicação da carga e o apoio mais próximo (Figuras 6.3 e 6.4).

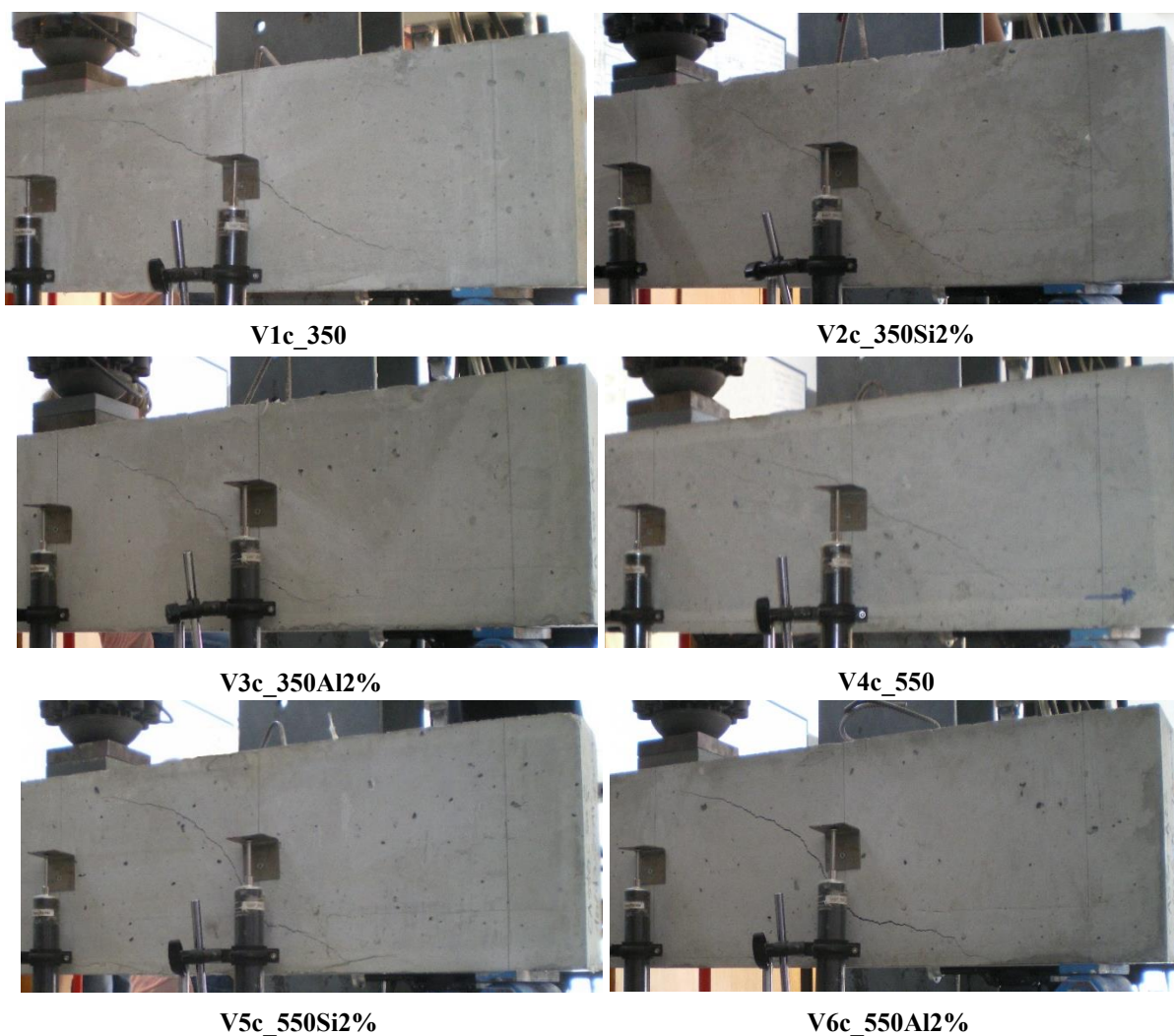
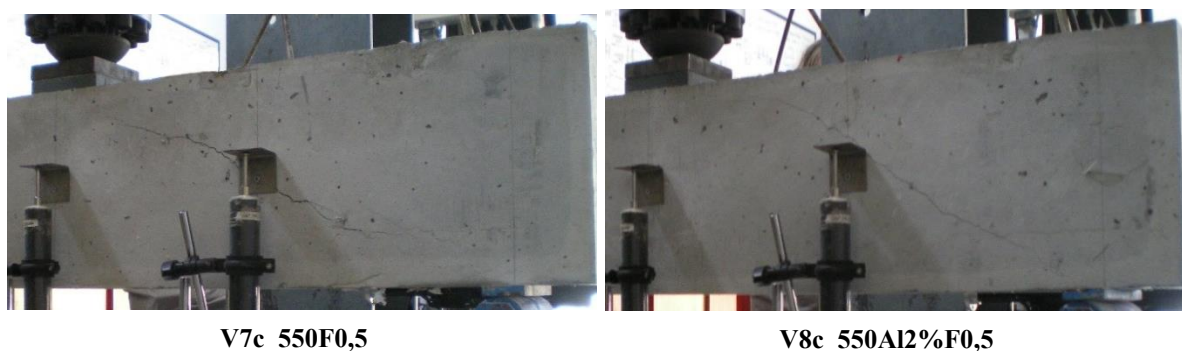
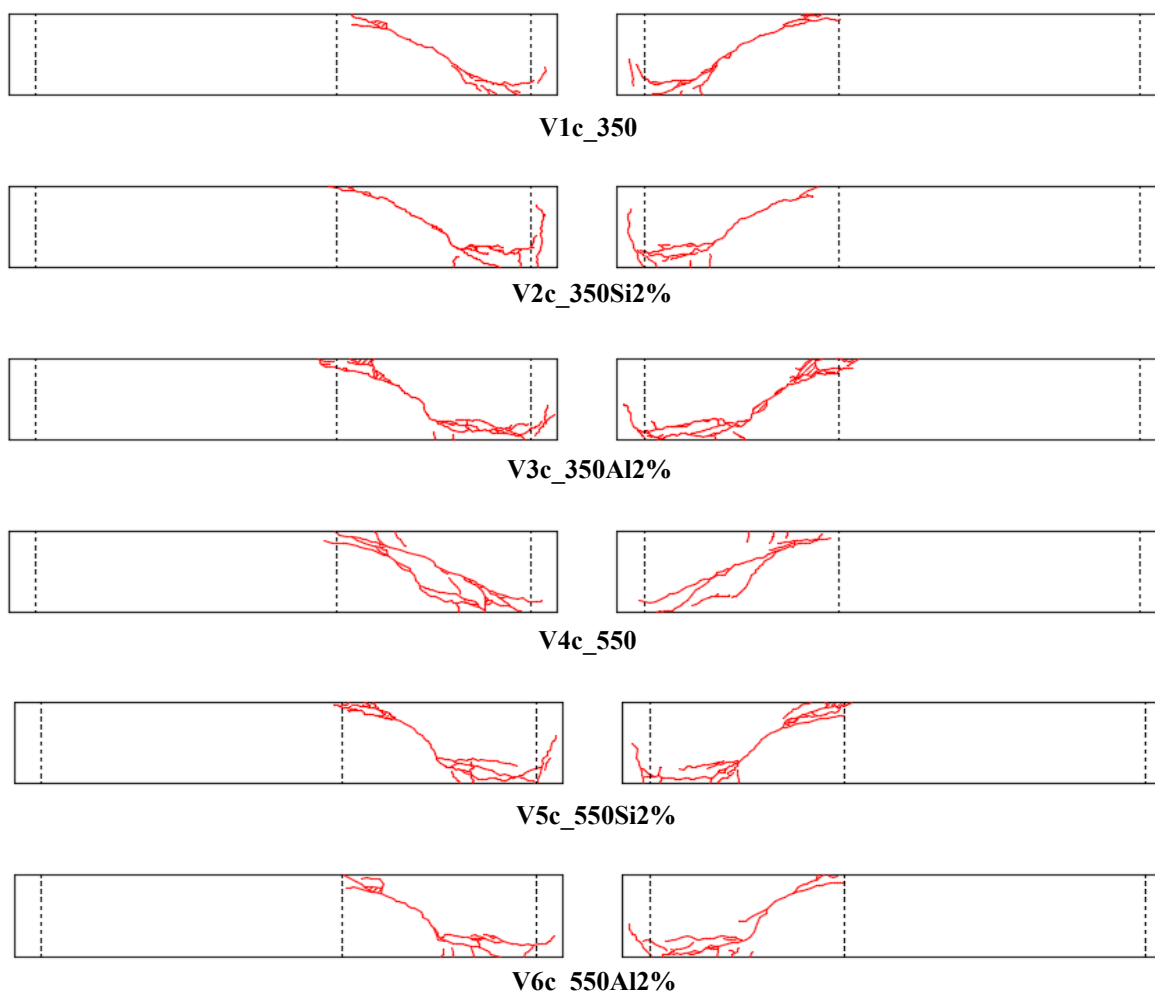


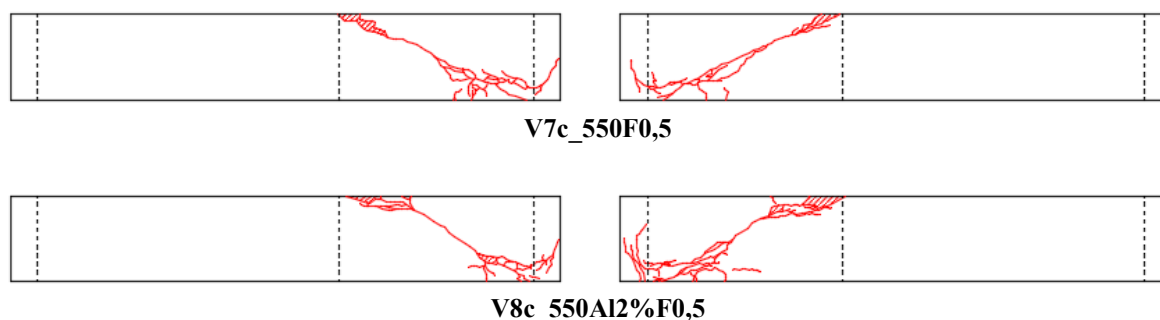
Figura 6.3 – Primeira fenda de corte (1)

**Figura 6.4 – Primeira fenda de corte (2)**

Incluem-se, ainda, as Figuras 6.5 e 6.6 com a configuração mais explícita, em *CAD*<sup>®</sup>, do padrão de fendilhação, mas no instante da rotura das vigas, em ambas as faces de cada viga. *Nota:* as linhas verticais a tracejado representam os locais dos apoios e o ponto de aplicação da carga; no lado esquerdo encontra-se a face onde constavam os LVDTs verticais e no lado direito a face que não tinha LVDTs.

**Figura 6.5 – Padrão de fendilhação das vigas - ensaio ao corte (1)**





**Figura 6.6 – Padrão de fendilhação das vigas - ensaio ao corte (2)**

O tipo de rotura foi igual em todas as vigas, por condicionalismo imposto na idealização das mesmas, ou seja, foi sempre uma rotura por esforço transverso. A fendilhação teve essencialmente duas fases: na primeira, deu-se o aparecimento da primeira fenda de corte sem grande abertura, que atravessou diagonalmente a viga na zona sem estribos; na segunda, a primeira fenda de corte alargou e em algumas situações existiu um muito ligeiro destacamento do betão e o aparecimento de pequenas fendas ramificadas junto do apoio e do ponto de aplicação da carga. Alerta-se para o facto de na viga V4c\_550, após a abertura da primeira fenda, ter surgido outra fenda de corte, em vez da primeira ter alargado.

A incorporação de nanopartículas não parece ter um efeito visível na forma como a primeira fenda de corte surge.

As vigas com fibras aguentaram durante mais tempo a transmissão de cargas, devido ao atravessamento da fenda pelas fibras, criando as já mencionadas “*pontes de tensão*” (Figura 6.7).



**Figura 6.7 – Pormenor da fenda de corte da viga V8c\_550Al2F0,5**

Um elemento interessante a analisar na fendilhação do esforço transversal é a inclinação da fenda principal. A inclinação da fenda dá uma ideia da capacidade de resistência ao esforço transversal das vigas, sendo que para vigas sem estribos (como é o caso) os ângulos são usualmente menores que em vigas com reforço (Hassan *et al*, 2012). De uma forma genérica, quanto menor for a resistência ao esforço transversal, menor será o ângulo da fenda de corte. Os ângulos foram medidos, em graus, conforme a Figura 6.8.



**Figura 6.8 – Ângulos da fenda de corte da viga V1c\_350**

No Quadro 6.5 constam os valores da inclinação da fenda ( $\theta_{fenda}$ ), que correspondem à média das inclinações da fenda em cada face, para cada uma das vigas, medidos após o fim do ensaio.

**Quadro 6.5 – Inclinação das fendas de corte**

Viga	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$V_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\theta_{fenda}$ (°)
V1c_350	32,1	41,78	27,4
V2c_350Si2%	34,6	33,51	30,7
V3c_350Al2%	32,1	42,83	25,9
V4c_550	59,3	57,98	25,2
V5c_550Si2%	59,3	63,16	28,3
V6c_550Al2%	58,2	62,09	28,6
V7c_550F0,5	63,2	97,82	25,1
V8c_550Al2%F0,5	62,8	66,75	27,5

Do Quadro 6.5, conclui-se que, embora os valores de  $\theta_{fenda}$  apresentem pouca variação, com um valor médio de cerca de 27°, não parece existir qualquer tipo de correlação entre o tipo de betão (nem tendo em conta a incorporação de nanopartículas e/ou fibras) e os valores da inclinação da fenda, algo já previsível tendo em conta os subcapítulos anteriores.

Alerta-se para o facto de a medição dos ângulos de inclinação das fendas poder acarretar dispersão, uma vez que é feita com base visual.

## 6.2. Análise do Comportamento à Flexão

### 6.2.1. Relação Carga - Deslocamento

O primeiro subcapítulo da análise do comportamento à flexão, tal como aconteceu no caso da análise do comportamento ao corte, volta a ser dedicado à relação entre carga e deslocamento. Assim, apresentam-se os diagramas  $F-\delta$ , obtidos experimentalmente, para cada uma das oito vigas ensaiadas à flexão.

As curvas  $F-\delta$  obtiveram-se de uma forma semelhante às dos ensaios de corte, em que  $F$  foi medido por uma célula de carga alocada no atuador e  $\delta$  foi medido diretamente através de um LVDT colocado na secção a meio vão da viga, sob o ponto de aplicação da carga.

Os resultados estão apresentados na Figura 6.9, que tem como objetivo facilitar a análise da forma como evoluíram as flechas das vigas em função do carregamento imposto. No Anexo E apresentam-se os resultados divididos por séries (série 350 e série 550), para melhor evidenciar as diferenças de comportamento entre as vigas da mesma série.

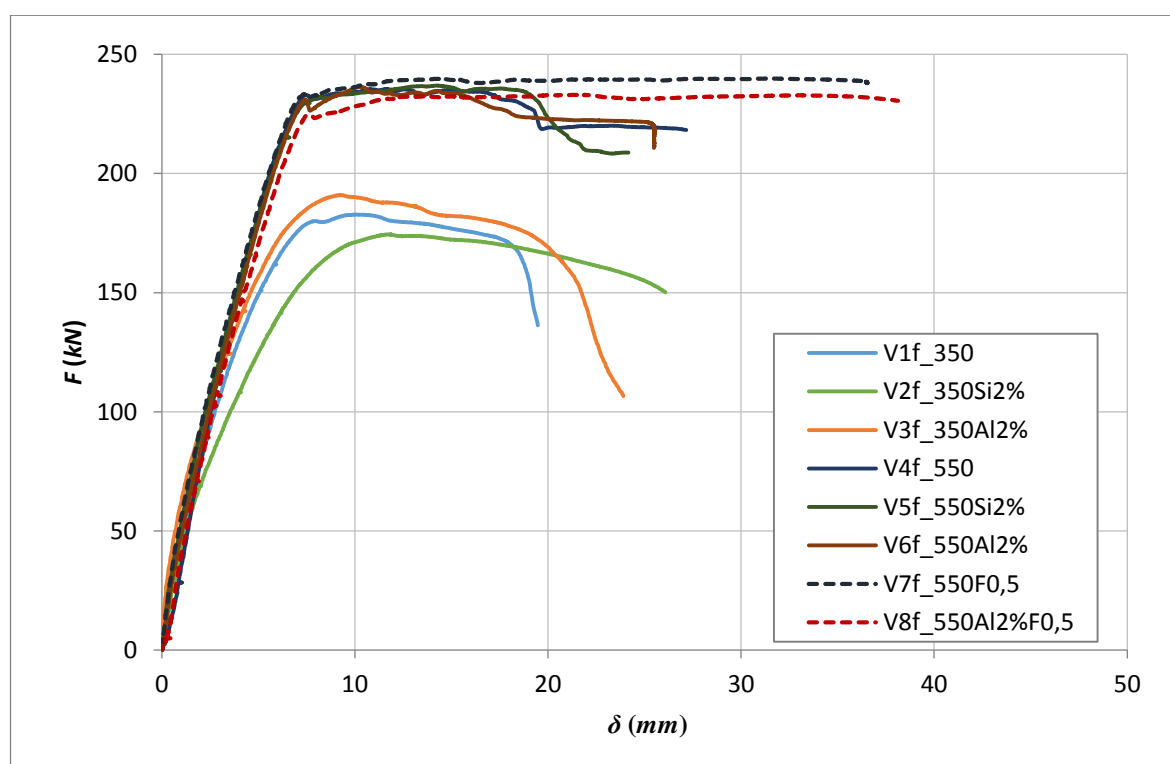


Figura 6.9 – Diagramas carga-deslocamento das vigas ensaio à flexão

No Quadro 6.6 apresentam-se os valores referentes à carga máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) e ao deslocamento máximo ( $\delta_{m\acute{a}x}$ ) para as oito vigas, do ensaio à flexão. Neste trabalho considerou-se  $F_{m\acute{a}x}$  como o máximo valor de força suportado.

**Quadro 6.6 – Valores de carga e flecha do ensaio à flexão**

Viga	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)
V1f_350	32,1	182,78	10,00
V2f_350Si2%	34,6	174,44	11,70
V3f_350Al2%	32,1	190,97	9,25
V4f_550	59,3	235,48	11,56
V5f_550Si2%	59,3	236,95	14,27
V6f_550Al2%	58,2	236,34	10,29
V7f_550F0,5	63,2	239,94	31,50
V8f_550Al2%F0,5	62,8	233,10	21,58

Da análise dos diagramas constantes na Figura 6.9 e do Quadro 6.6 conseguem-se tirar algumas ilações. Primeiro, os diagramas apresentam, fundamentalmente, três zonas diferentes (*i.e.* com inclinações diferentes):

- uma primeira zona, caracterizada por um troço reto ascendente com um declive elevado, muito difícil de visualizar. Nesta fase ainda não ocorreu a fendilhação do betão e a zona corresponde ao “Estado I”;
- uma segunda zona, fase fendilhada, que é também caracterizada por um troço reto ascendente, porém, com menor inclinação que o anterior. Nos diagramas, só com uma ampliação da visualização é que é possível evidenciar a variação de declive, embora um pouco difícil. Esta zona corresponde ao “Estado II”;
- uma terceira zona, composta por um troço tendencialmente horizontal, que tem início com a cedência das armaduras, e é caracterizada por uma abertura e desenvolvimento das fendas e por uma evolução acentuada da deformação, para uma baixa variação de carga aplicada. O comprimento do troço é tanto maior quanto mais elevada for a ductilidade da viga. Como todas as vigas ensaiadas tinham armaduras iguais, só existe variação considerável desse comprimento quando se introduzem fibras (V7f\_550F0,5 e V8f\_550Al2%F0,5). Esta fase também se costuma denominar por “Estado III”;

Segundo, a força máxima em flexão ( $F_{m\acute{a}x}$ ), é superior na série 550. A viga V8f\_550Al2%F0,5 volta a revelar-se insatisfatória, apresentando o menor valor dessa série, enquanto na série 350

a adição de 2 % de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  voltou a provar o seu contributo, induzindo o maior valor para essa série.

Em suma, pela análise dos diagramas  $F-\delta$ , a incorporação de nanopartículas não parece induzir variações muito evidentes na série 550, e só a incorporação de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na série 350 parece produzir alguns ganhos.

Um aspeto importante a analisar é a deformação das vigas para diferentes níveis de carga. Como tal, nas Figuras 6.10 e 6.11 apresentam-se as deformadas das vigas em flexão, em projeção lateral, para patamares de carga de 25 %, 50 %, 75 % e 100 % de  $F_{\text{máx}}$ . O traçado da deformação foi feito recorrendo aos 3 LDVTs verticais mencionados no Subcapítulo 5.5.3. Os diagramas apresentados nas Figuras 6.10 e 6.11 comportam dois eixos: abcissas (distância entre os pontos de medição, em  $\text{mm}$ ) e ordenadas (flecha/deslocamento, em  $\text{mm}$ ). Alerta-se para o facto dos diagramas constantes nessas mesmas figuras serem uma aproximação feita recorrendo ao *software Microsoft® Excel*, podendo existir pequenos desvios em relação à deformada real da viga.

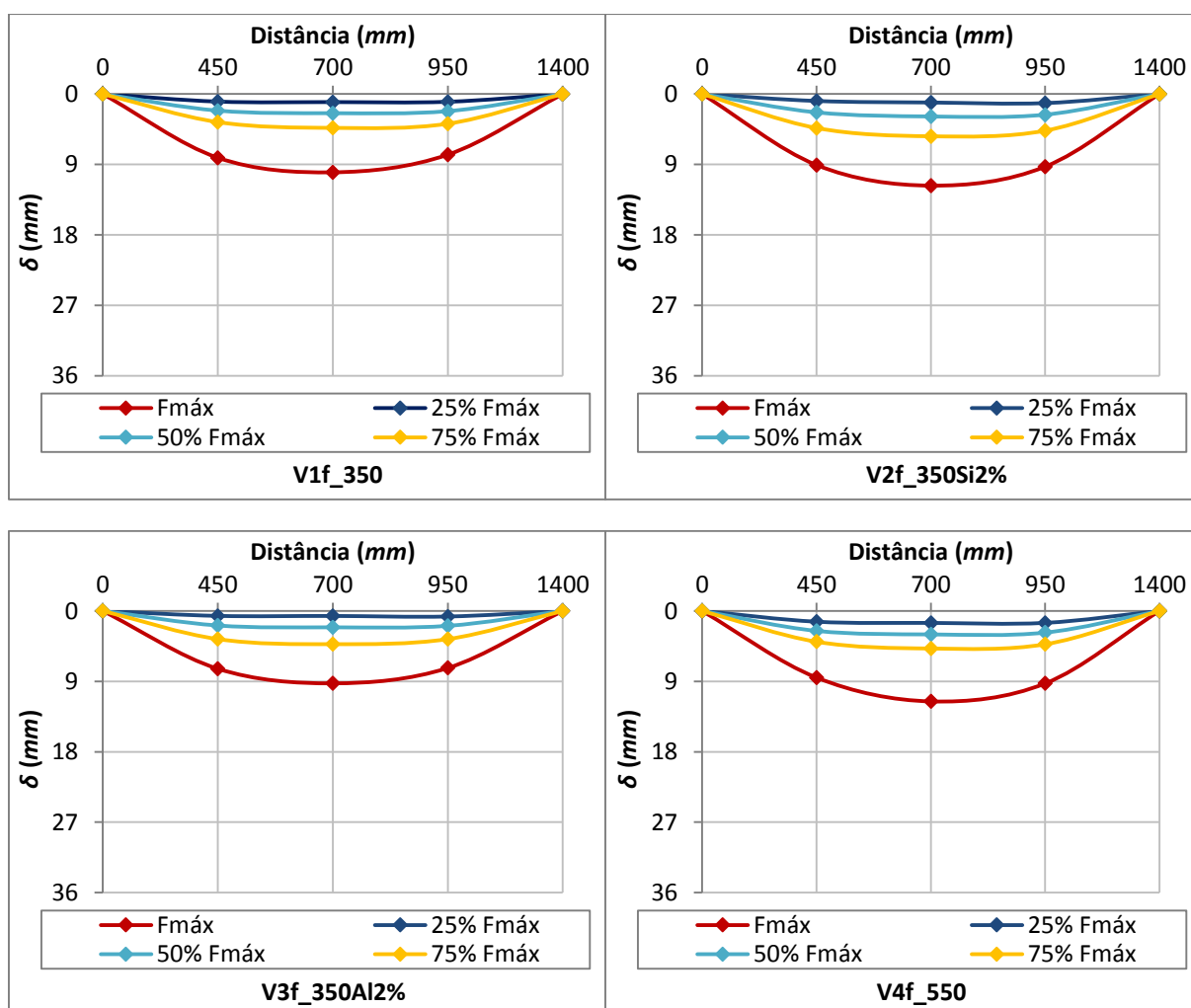


Figura 6.10 – Evolução da deformação das vigas de ensaio à flexão (1)

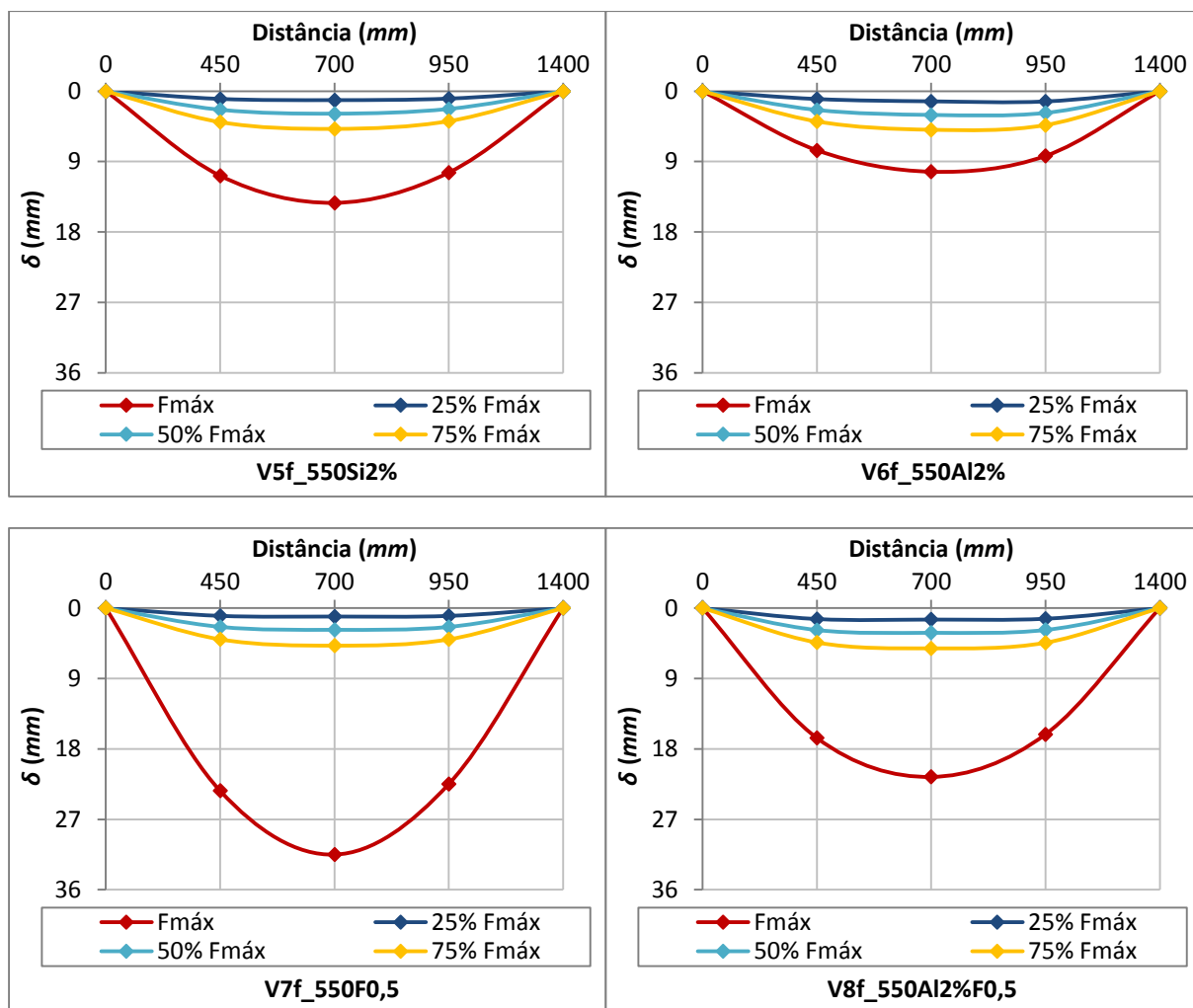
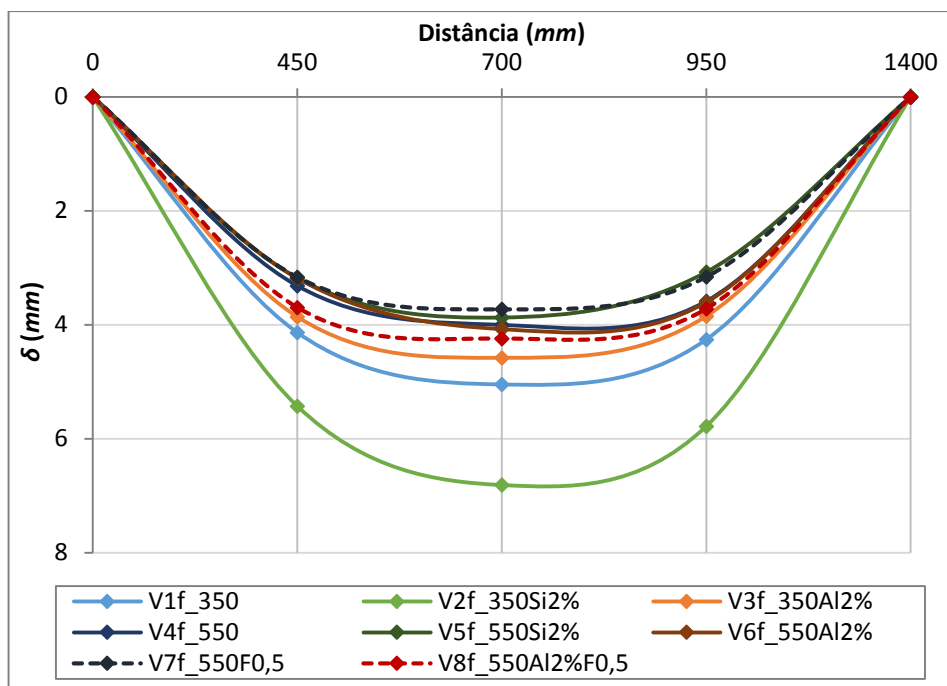


Figura 6.11 – Evolução da deformação das vigas de ensaio à flexão (2)

As figuras elucidam que as vigas com fibras apresentam a maior deformação máxima, enquanto a viga V3f\_350Al2% apresenta a menor. É ainda perceptível que a variação de deformação mais significativa ocorre após a aplicação de pelo menos 75 % da carga, que poderá estar relacionada com perdas de rigidez originadas pela existência de uma fendilhação mais acentuada.

Uma vez que as deformadas têm em conta a força máxima detetada nas vigas, e sendo essa variável de viga para viga, optou-se também por realizar uma comparação entre as séries, para um valor de carga comum. Como tal, escolheu-se o valor de 150 kN para confrontar a flecha nas diferentes vigas (Figura 6.12).



**Figura 6.12 – Deformação das vigas de ensaio à flexão –  $F = 150 \text{ kN}$**

Para o mesmo estágio de força, as vigas V3f\_350Al2%, V5f\_550Si2% e V7f\_550F0,5 são as que apresentam a menor deformação para a série 350, 550 sem fibras e 550 com fibras, respetivamente.

Além disso, não parece existir uma tendência claramente benéfica com a incorporação das nanopartículas (considerando ambas as séries). Esta análise dá indícios sobre a rigidez das vigas, que será analisada no subcapítulo 6.2.3, com a qual deverá ser feita uma comparação.

## 6.2.2. Análise dos Valores de Momento

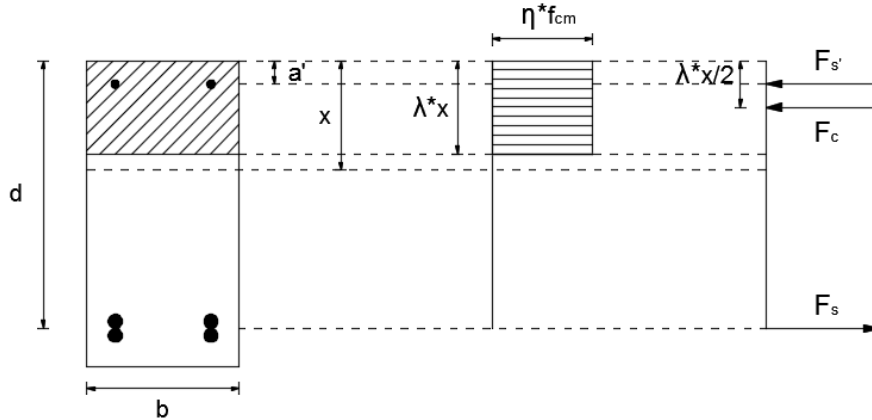
Dos parâmetros mais essenciais a analisar destacam-se os momentos associados ao comportamento estrutural das vigas: o momento máximo (experimental) e o momento teórico (ou de cálculo). É também pertinente o estudo da relação entre os valores dos momentos e outros parâmetros (*e.g.* valores de curvatura).

### 6.2.2.1. Momento Teórico

Numa fase inicial, foi feita uma avaliação dos valores teóricos dos momentos resistentes ( $M_{teo}$ ) nas vigas de ensaio à flexão, com o objetivo de fazer uma previsão dos valores experimentais e uma posterior comparação com estes. Refere-se, novamente, que os valores característicos (*e.g.*  $f_{ck}$ ), usualmente propostos pelos regulamentos, foram sempre substituídos pelos valores médios (*e.g.*  $f_{cm,cil}$ ).

### ***M<sub>teo</sub> – Vigas sem fibras***

A determinação do valor de cálculo do momento resistente ( $M_{teo}$ ), ou carga máxima teórica, das vigas V1f\_350, V2f\_350Si2%, V3f\_350Al2%, V4f\_550, V5f\_550Si2% e V6f\_550Al2%, foi feita de acordo com uma distribuição retangular equivalente de tensões de compressão (Figura 6.13), segundo o procedimento preconizado no EC2, como simplificação do diagrama real.



**Figura 6.13 – Distribuição tensões para cálculo do  $M_{teo}$  - vigas sem fibras**

Assim, o valor de  $M_{teo}$  foi calculado através da Expressão 6.9:

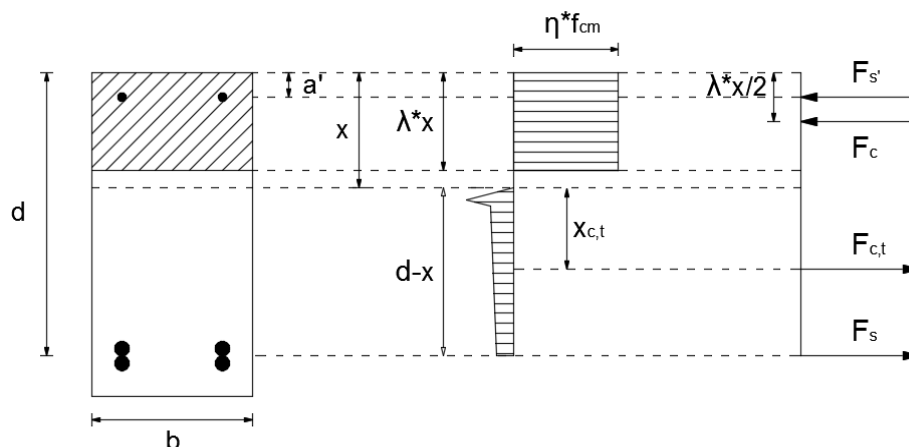
$$M_{teo}(kN.m) = F_s' \times (d - a') + F_c \times \left(d - \frac{\lambda \times x}{2}\right) \quad (6.9)$$

*Legenda:*  $F_s'$  - força na armadura comprimida (kN);  $d$  - altura útil da seção (m);  $a'$  - distância entre a armadura comprimida e a face superior da secção (m);  $F_c$  - força no betão (kN);  $\lambda$  e  $\eta$  - coeficientes (EC2);

### ***M<sub>teo</sub> – Vigas com fibras***

A determinação do valor de  $M_{teo}$  para as vigas com fibras (V7f\_550F0,5 e V8f\_550Al2%F0,5) foi feita de uma forma semelhante para o caso sem fibras, contando-se apenas o contributo adicional da força de tração resultante da presença das fibras, seguindo mais uma vez a recomendação RILEM TC 162-TDF (Figura 6.14).





**Figura 6.14 - Distribuição de tensões para cálculo do  $M_{teo}$  - vigas com fibras**

O valor de  $M_{teo}$  foi calculado através da Expressão 6.10:

$$M_{teo}(kN.m) = F_s' \times (d - a') + F_c \times \left(d - \frac{\lambda \times x}{2}\right) - F_{c,t} \times ((d - x) - x_{c,t}) \quad (6.10)$$

*Legenda:*  $F_s'$  - força na armadura comprimida (kN);  $d$  - altura útil da seção (m);  $a'$  - distância entre a armadura comprimida e a face superior da seção (m);  $F_c$  - força no betão (kN);  $\lambda$  e  $\eta$  - coeficientes (EC2);  $F_{c,t}$  - força de tração nas fibras (kN);  $x_{c,t}$  - posição da força de tração nas fibras (kN);

Todos os procedimentos e expressões de cálculo utilizados (incluindo as expressões dos cálculos intermédios), para determinar o  $M_{teo}$  das vigas sem e com fibras, são apresentados em pormenor no Anexo F.

Os valores dos momentos teóricos ( $M_{teo}$ ) estão resumidos no Quadro 6.7. Nesse quadro, à semelhança do que se fez na análise do esforço transversal, também se incluem os valores da relação entre o valor de  $M_{teo}$  da viga e o valor de  $M_{teo}$  da viga de referência (V1f\_350 para a série 350 e V4f\_550 para a série 550).

No cálculo dos valores de  $M_{teo}$ , para as vigas estudadas, a posição do eixo neutro ( $x$ ) desempenha um papel preponderante. A tendência será a de o valor de  $x$  diminuir com o aumento da resistência, exceto no caso em que se incluíam fibras, contribuindo estas para um ligeiro aumento desse valor, devido à sua capacidade de restrição da propagação das fendas. Pela observação do Quadro 6.7 essa disposição verifica-se, de um modo geral, com as vigas da Série 350 a preverem-se ter os maiores valores de  $x$ , seguidas das vigas com fibras e das vigas sem fibras da Série 550. Pequenos desvios dos valores poderão estar um pouco relacionados com as dispersões nas dimensões das vigas.

**Quadro 6.7 – Valores teóricos do momento**

Viga	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$x$ (m)	$M_{teo}$ (kN.m)	$M_{teo} / M_{teo,ref}$	
				Série 350	Série 550
V1f_350	32,1	0,1214	61,64	1,00	---
V2f_350Si2%	34,6	0,1123	60,76	0,99	---
V3f_350Al2%	32,1	0,1203	58,45	0,95	---
V4f_550	59,3	0,0737	69,18	---	1,00
V5f_550Si2%	59,3	0,0714	67,20	---	0,97
V6f_550Al2%	58,2	0,0737	69,12	---	1,00
V7f_550F0,5	63,2	0,0744	70,32	---	1,02
V8f_550Al2%F0,5	62,8	0,0745	70,34	---	1,02

Relativamente aos valores dos momentos teóricos, na passagem da série 350 para a série 550 sem fibras prevê-se um aumento a variar entre 11 e 18 %.

O Quadro 6.7 permite, além disso, prever a influência das nanopartículas e das fibras na resistência à flexão: tal como na resistência ao corte, na série 350 verifica-se que as nanopartículas não beneficiarão as vigas em termos de resistência à flexão, estimando-se perdas de 1 % e 5 % para as vigas V2f\_350Si2% e V3f\_350Al2%, respetivamente; na série 550, para as vigas sem fibras, também não existirão alterações significativas no comportamento das vigas com a introdução de nanopartículas - a introdução de 2 % de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> induzirá numa ligeira perda do valor do momento resistente; por fim, na série 550 com fibras, as nanopartículas desempenharão um papel secundário, não se prevendo qualquer influência na resposta mecânica das vigas, devido ao efeito preponderante e positivo das fibras.

#### 6.2.2.2. Momento Máximo (Experimental)

O momento máximo obtido nos ensaios experimentais ( $M_{m\acute{a}x}$ ) foi determinado a partir dos diagramas de esforços da Figura 5.17 do Subcapítulo 5.51 e tendo por base o valor de  $F_{m\acute{a}x}$  detetado pelo atuador durante os ensaios experimentais (Expressão 6.11).

$$M_{m\acute{a}x}(kN.m) = 0,3375 \times F_{m\acute{a}x} \quad (6.11)$$

No Quadro 6.8 apresentam-se os valores de  $M_{m\acute{a}x}$ .

Quadro 6.8 – Valores experimentais do momento

Viga	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$M_{máx}$ (kN.m)	$M_{máx} / M_{máx, ref}$	
			Série 350	Série 550
V1f_350	32,1	61,69	1,00	---
V2f_350Si2%	34,6	58,87	0,95	---
V3f_350Al2%	32,1	64,45	1,04	---
V4f_550	59,3	79,48	---	1,00
V5f_550Si2%	59,3	79,97	---	1,01
V6f_550Al2%	58,2	79,77	---	1,00
V7f_550F0,5	63,2	80,98	---	1,02
V8f_550Al2%F0,5	62,8	78,67	---	0,99

Da análise do Quadro 6.8, podem-se efetuar algumas reflexões. Por um lado, os valores da resistência à flexão ( $M_{máx}$ ) estão relacionados com os diagramas F- $\delta$  da Figura 6.9 (Subcapítulo 6.2.1), algo que já era esperado. Por outro lado, a adição de nanopartículas de  $Al_2O_3$  induz um ganho de 4 % na série 350, enquanto a adição de nanopartículas  $SiO_2$  induz uma perda de 5 %. As nanopartículas não revelam qualquer benefício para a série 550. Na série 350 o valor de  $M_{máx}$  é atingido um pouco antes do colapso da viga, enquanto na série 550 é atingido mais próximo do colapso.

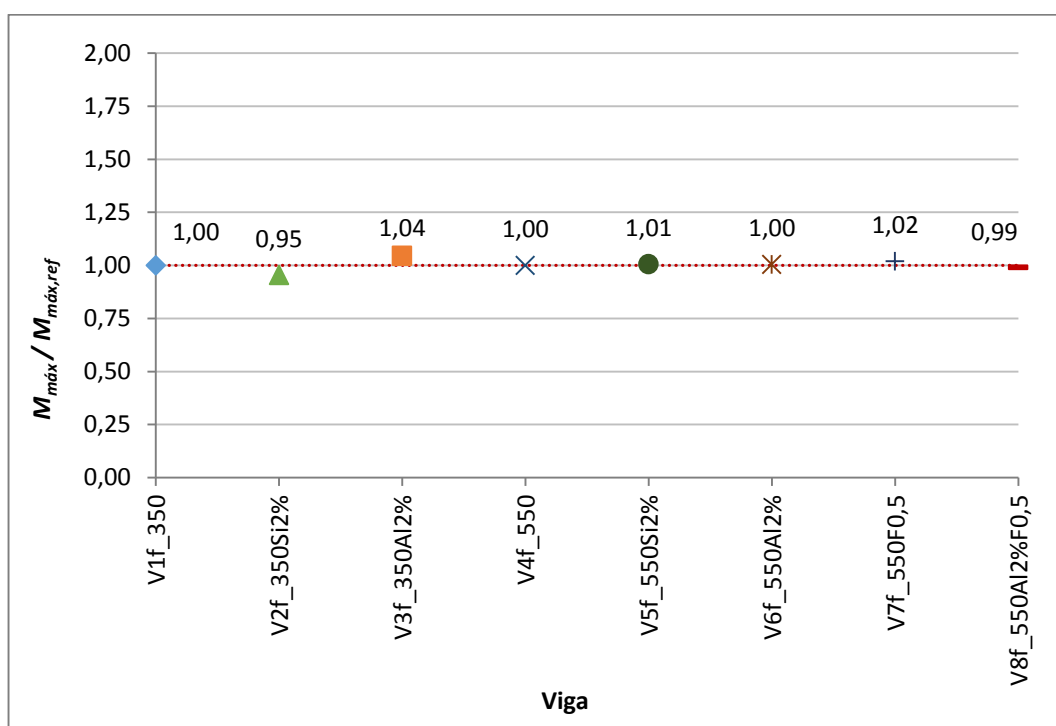


Figura 6.15 – Relação do momento máximo (experimental) entre as vigas com nanopartículas e fibras e as vigas de referência

Na Figura 6.15, por forma a evidenciar os ganhos/perdas originados pela incorporação de nanopartículas, consta a relação  $M_{m\acute{a}x} / M_{m\acute{a}x,ref}$  em função das misturas utilizadas nas vigas de ensaio à flexão. A incorporação de nanopartículas não parece originar efeitos satisfatórios, nem se consegue concluir claramente se existe uma tendência positiva, considerando os resultados da série 350 e a série 500 em conjunto.

No Anexo G apresenta-se a relação  $M_{m\acute{a}x} - f_{cm,cil}$ .

### 6.2.2.3. Relação $M_{teo} / M_{m\acute{a}x}$

Tal como aconteceu na análise do esforço transversal, também neste subcapítulo se efetua uma comparação, clara, dos valores teóricos e dos valores experimentais.

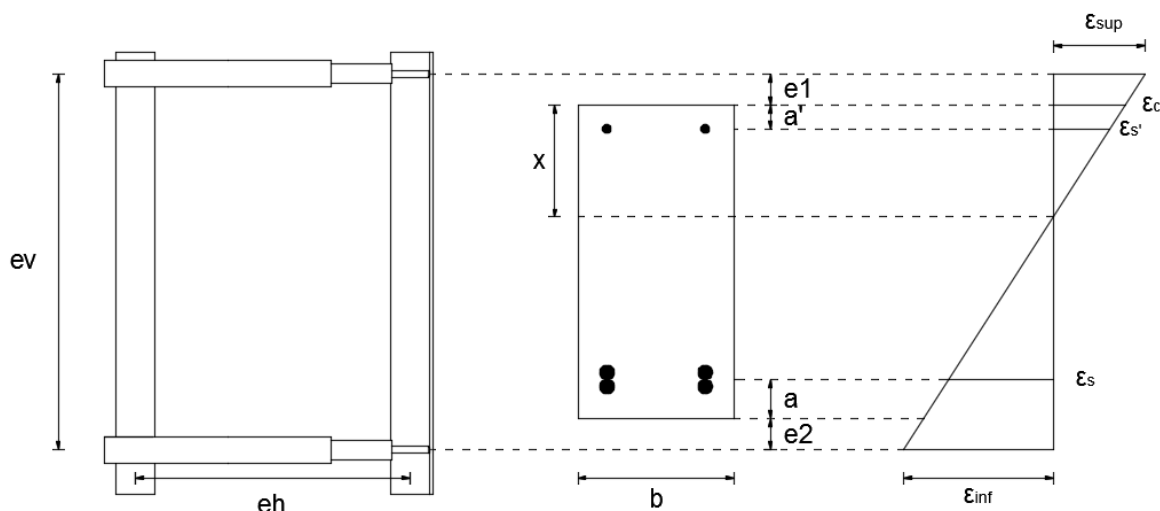
A análise do Quadro 6.9 permite evidenciar se a previsão da resistência à flexão foi adequada: constata-se uma maior aproximação entre os valores teóricos e os experimentais do que no caso do estudo do esforço transversal. No geral, os valores teóricos foram inferiores aos experimentais - tal poderá estar relacionado com os valores obtidos nos ensaios de caracterização do betão e que foram utilizados para a previsão da resistência à flexão.

**Quadro 6.9 – Relação entre valores teóricos e experimentais do momento**

Viga	$M_{teo} / M_{m\acute{a}x}$
V1f_350	1,00
V2f_350Si2%	1,03
V3f_350Al2%	0,91
V4f_550	0,87
V5f_550Si2%	0,84
V6f_550Al2%	0,87
V7f_550F0,5	0,87
V8f_550Al2%F0,5	0,89

### 6.2.2.4. Relação Momento - Curvatura

A curvatura na região crítica da viga, zona de momentos máximos (zona central), foi determinada através dos transdutores de deslocamento horizontais (Figura 6.16). O comprimento da região em análise rondou os 0,24 m (eh).



**Figura 6.16 – Esquemas para cálculo da curvatura**

Assim, para o cálculo dos valores de curvatura considerou-se a Expressão 6.12, porque a curvatura corresponde à inclinação da reta das extensões:

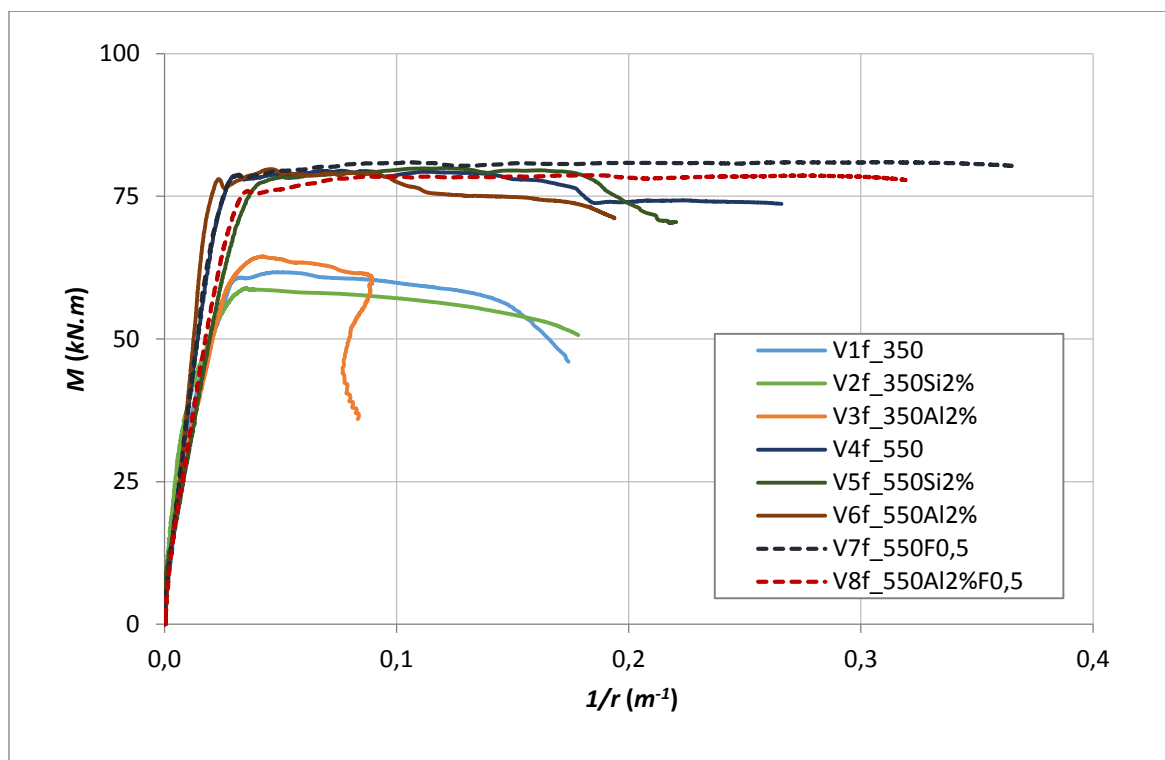
$$1/r \text{ (m}^{-1}\text{)} = \frac{|\varepsilon_c| + |\varepsilon_s|}{d} \quad (6.12)$$

*Legenda:*  $1/r$  - curvatura da seção ( $m^{-1}$ );  $\varepsilon_c$  – valor da extensão no betão;  $\varepsilon_s$  – valor da extensão na armadura tracionada;  $d$  – altura útil da seção ( $m$ );

Todos os procedimentos e expressões de cálculo utilizados (incluindo as expressões dos cálculos intermédios), para determinar a curvatura das vigas, apresentam-se em pormenor no Anexo H.

A forma de instrumentação utilizada permite, assim, determinar os valores das extensões em qualquer fibra ao longo da altura da viga, tendo por base a hipótese da conservação das seções planas (Bernoulli), para qualquer instante do ensaio.

Os valores obtidos para a curvatura, média da zona central das vigas, encontram-se nos diagramas  $M-1/r$  da Figura 6.17. No Anexo I são apresentados os resultados divididos por séries (série 350 e série 550), para melhor evidenciar as diferenças de comportamento entre as vigas da mesma série.



**Figura 6.17 – Diagramas momento-curvatura**

Antes de tudo, existe um pormenor que é altamente evidente pela análise dos diagramas: há um andamento invulgar na zona final da curva  $M-1/r$  da viga V3f\_350Al2%. Fez-se uma análise um pouco minuciosa dos dados recolhidos desse ensaio e constatou-se que na parte final do ensaio os LVDTs horizontais (apenas) começaram a registar dispersivamente os dados. Tal fenómeno é justificado pela fendilhação final excessiva dessa viga, no bordo superior (ver Figura 6.24, mais adiante, no Subcapítulo 6.2.5), que fez com que o suporte dos LVDTs horizontais tendesse no sentido contrário ao da deformação. Por outras palavras, o LVDT superior começou a estender e o LVDT inferior a contrair.

Da análise dos diagramas constantes na Figura 6.17, constata-se que as vigas da série 550 apresentam maiores valores de curvatura que as da série 350 (como era esperado). Tendo em conta que o andamento das curvas  $M-1/r$  é muito idêntico ao das curvas  $F-\delta$ , as conclusões que se retiram são semelhantes.

### 6.2.3. Análise da Rigidez

A rigidez à flexão de um elemento ( $EI$ ) é definida pelo produto entre o módulo de elasticidade do material e a inércia da secção homogénea equivalente, pelo que uma viga de betão armado será tanto mais rígida quanto maior for o módulo de elasticidade do betão, bem como, quanto maior for a inércia da secção e quanto maior for a percentagem de armadura longitudinal.

Prevê-se, à partida, que a rigidez diminua à medida que o ensaio vai decorrendo, por consequência do aumento do valor da flecha e da correspondente evolução das extensões nos materiais, levando ao aparecimento e evolução da fendilhação. Deste modo, faz-se uma análise separada do valor da rigidez para o “Estado I” (ou “Estado não fendilhado”) e para o “Estado II” (ou “Estado fendilhado”). Primeiro realiza-se uma estimativa teórica e posteriormente, com base nos dados experimentais registados, determina-se a rigidez à flexão experimental para as oito vigas ensaiadas.

### 6.2.3.1. Rigidez Teórica

O cálculo da rigidez teórica ( $EI_{I,teo}$  e  $EI_{II,teo}$ ) realiza-se da mesma forma para todas as vigas, quer sejam sem ou com fibras.

A previsão teórica do valor da rigidez para o “Estado I” ( $EI_{I,teo}$ ), considerando a secção de betão homogeneizada, é mais simples, uma vez que nesta fase toda a secção contribui para a rigidez, pois a fendilhação do betão ainda não ocorreu.

No que diz respeito à previsão da rigidez para o “Estado II” ( $EI_{II,teo}$ ), esta é mais complexa uma vez que a secção já se encontra fendilhada, na maioria da zona tracionada, pelo que o valor respeitante à inércia da secção de betão considera apenas a zona comprimida.

Todos os procedimentos e expressões de cálculo utilizados (incluindo as expressões dos cálculos intermédios), para determinar o  $EI_{I,teo}$  e o  $EI_{II,teo}$  das vigas de ensaio à flexão, são apresentados em pormenor no Anexo J.

No Quadro 6.10 apresentam-se os valores de  $EI_{I,teo}$  e  $EI_{II,teo}$  calculados.

**Quadro 6.10 – Valores teóricos da rigidez**

Viga	$EI_{I,teo}$ ( $kN.m^2$ )	$EI_{II,teo}$ ( $kN.m^2$ )
V1f_350	6664	3139
V2f_350Si2%	6638	3007
V3f_350Al2%	7421	3061
V4f_550	8491	3420
V5f_550Si2%	8236	3240
V6f_550Al2%	8733	3451
V7f_550F0,5	8738	3427
V8f_550Al2%F0,5	7703	3169

Resumidamente, da análise do Quadro 6.10 constata-se que as nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  poderão ser satisfatórias, no geral, para um aumento da rigidez à flexão, quer para o “Estado I”, quer para o “Estado II”. Mas, compare-se os valores de  $EI_{I,teo}$  com as deformações das Figuras 6.10 e 6.11 (subcapítulo 6.2.1): existe um paralelismo para a série 350 apenas - as vigas incorporadas de nanopartículas com maior  $EI_{I,teo}$  foram as que apresentaram menor deformação experimentalmente. No “Estado II”, essa relação não é evidente.

Resta ainda perceber se os valores experimentais para a rigidez à flexão revelarão as mesmas evidências constatadas neste subcapítulo.

### 6.2.3.2. Rigidez Experimental

Experimentalmente, a rigidez é avaliada através do declive de duas retas traçadas no diagrama  $M-I/r$ , uma para o primeiro troço reto (“Estado I”), antes da fendilhação, e outra para o segundo troço reto (“Estado II”), após a fendilhação. No entanto, devido ao facto de os diagramas apresentarem dispersões iniciais consideráveis (e ser muito difícil a identificação da transição entre o “Estado I” e o “Estado II”, no diagrama  $M-I/r$ ), não foi possível determinar o  $EI_{I,exp}$  (por ajustamento de uma reta) de uma forma que fosse exata e inequívoca. Por esse motivo, não são apresentados os seus valores. Para a determinação do  $EI_{II,exp}$  teve-se esses condicionalismos em conta e considerou-se a reta de ajuste a iniciar num ponto correspondente a 40 % do  $M_{máx}$  e a terminar num ponto correspondente a 80 % do  $M_{máx}$  (ajustando-se com a melhor correlação possível com o diagrama  $M-I/r$ ). Este critério foi definido para garantir uma uniformidade na metodologia usada na determinação de  $EI_{II,exp}$ .

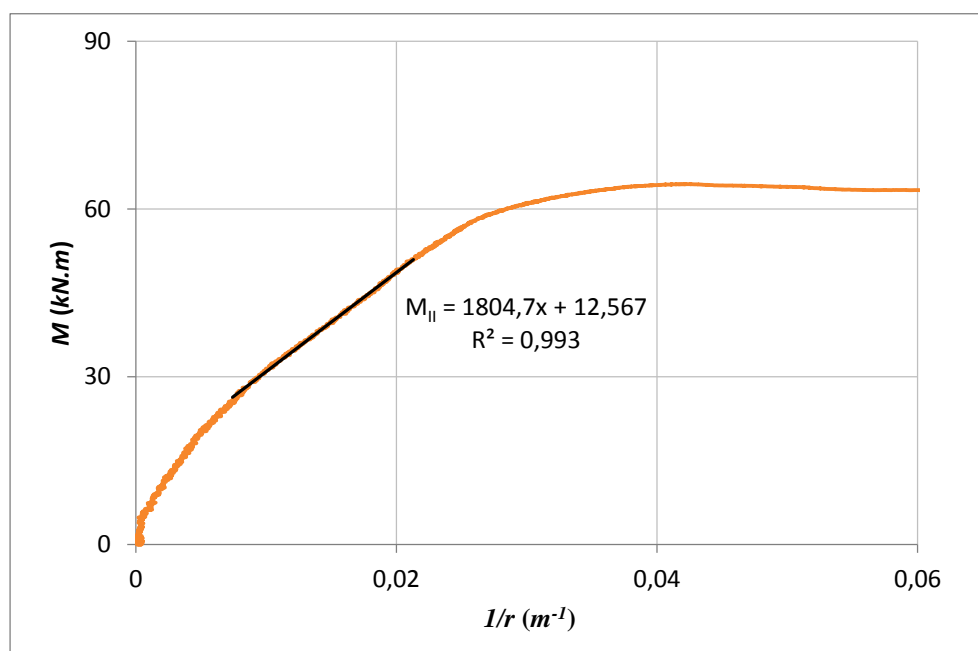


Figura 6.18 – Diagrama  $M-I/r$  para análise da rigidez experimental – V3f\_350Al2%



Uma vez que os diagramas  $M-l/r$  já foram apresentados anteriormente, no Subcapítulo 6.2.2.4, optou-se por não os expor novamente. A título de exemplo do método adotado para o cálculo da rigidez experimental (apenas para o “Estado II”) apresenta-se o diagrama (reduzido) da viga V3f\_350Al2% (Figura 6.18).

Deste modo, traçou-se uma reta de tendência (para o “Estado II”), sobre a curva experimental de  $M-l/r$ , obtendo-se desta o valor do declive, que corresponde à rigidez para esse estado (Expressão 6.13).

$$1/r \text{ (m}^{-1}\text{)} = \frac{M}{EI} \quad (6.13)$$

No Quadro 6.11 apresentam-se os valores de  $EI_{II,exp}$  (apenas), determinados.

**Quadro 6.11 – Valores experimentais da rigidez**

Viga	$EI_{II,exp}$ (kN.m <sup>2</sup> )
V1f_350	1929,7
V2f_350Si2%	1772,1
V3f_350Al2%	1804,7
V4f_550	2959,4
V5f_550Si2%	2061,7
V6f_550Al2%	4403,2
V7f_550F0,5	3133,0
V8f_550Al2%F0,5	2324,1

Compreende-se, pela análise do Quadro 6.11, que os valores de  $EI_{II,exp}$  se encontram ligeiramente dispersos. Ainda assim, nota-se que as vigas da série 550 são, no geral, as que apresentam os maiores valores de rigidez, como era esperado, e que para o “Estado II” as vigas com maior rigidez foram a V1f\_350 e a V6f\_550Al2%, para a série 350 e 550 respetivamente.

Averiguando o efeito das nanopartículas, pela análise dos resultados constantes no Quadro 6.11, só as nanopartículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aparentam surtir um efeito positivo (no sentido de aumentar a rigidez do “Estado II” e, eventualmente, do “Estado I”), na série 550, exceto quando conjugadas com fibras de aço. As nanopartículas de SiO<sub>2</sub> revelam, por outro lado, ter um efeito negativo nos valores de  $EI_{II,exp}$ , para ambas as séries.

### 6.2.3.3. Relação $EI_{teo} / EI_{exp}$

Neste subcapítulo faz-se uma análise da relação entre os valores teóricos e os valores experimentais da rigidez à flexão.

**Quadro 6.12 – Relação entre valores teóricos e experimentais da rigidez**

Viga	$EI_{II,teo} / EI_{II,exp}$
V1f_350	1,63
V2f_350Si2%	1,70
V3f_350Al2%	1,70
V4f_550	1,16
V5f_550Si2%	1,57
V6f_550Al2%	0,78
V7f_550F0,5	1,09
V8f_550Al2%F0,5	1,36

Consultando o Quadro 6.12, no qual consta a relação entre os valores teóricos e os valores experimentais da rigidez para o “Estado II”, percebe-se que, de uma forma global, a rigidez experimental apresenta valores inferiores aos previstos teoricamente. Tal não deveria acontecer uma vez que a previsão foi efetuada com base nas propriedades dos ensaios de caracterização dos materiais, como já se referiu. Além disso, era previsto (para o “Estado II”) que pela contribuição do betão entre fendas, a rigidez experimental das vigas fosse maior que a teórica, ou seja, que a tensão de tração do betão entre fendas contribuísse para o aumento da rigidez. Poderão existir algumas dispersões consequentes do método escolhido para a determinação do  $EI_{II,exp}$ .

Analisando outro aspeto, nas Figuras 6.19 e 6.20 apresentam-se os diagramas que relacionam a rigidez à flexão de cada viga ( $EI$ ) na zona central, com os momentos ( $M$ ), até ao valor do momento máximo. Neles constam:

- a rigidez calculada a partir dos transdutores de deslocamento horizontais (*i.e.*  $EI_{exp}$ );
- a rigidez calculada teoricamente considerando a secção transversal não fendilhada e com as armaduras homogeneizadas (*i.e.* rigidez no “Estado I” –  $EI_{I,teo}$ );
- e a rigidez calculada teoricamente considerando a secção transversal totalmente fendilhada (*i.e.* rigidez no “Estado II” –  $EI_{II,teo}$ ).

Em teoria, desde o início do carregamento até ao ponto de cedência das armaduras de tração, a rigidez das vigas deveria situar-se entre estes dois valores.

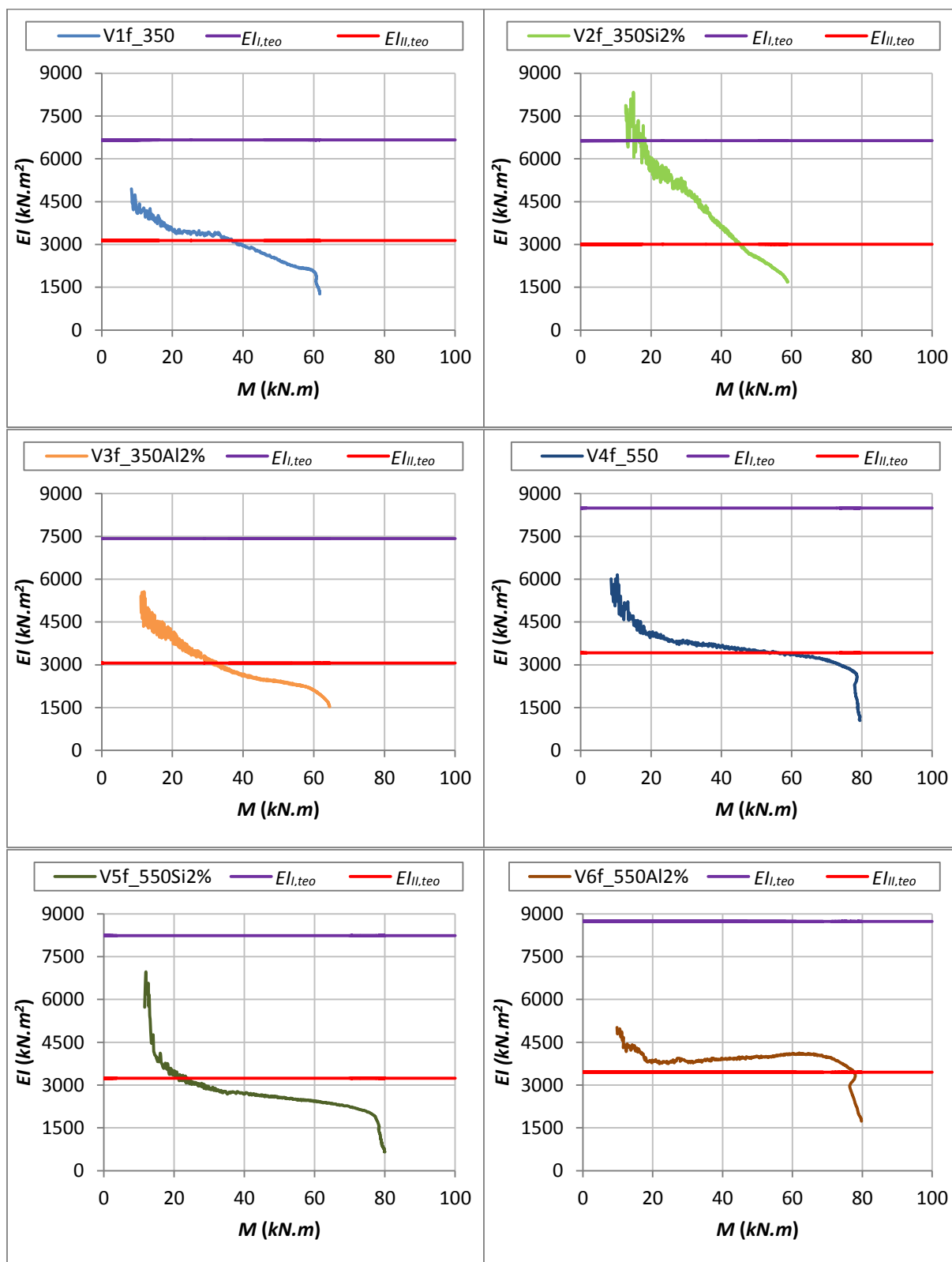


Figura 6.19 – Comparação entre os valores teóricos e experimentais da rigidez (1)

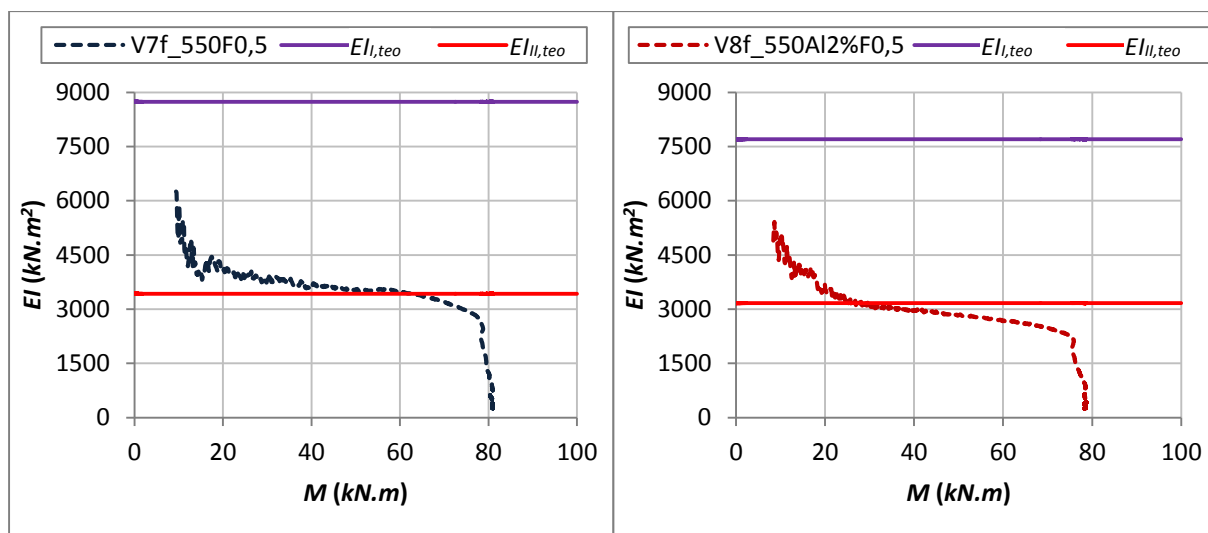


Figura 6.20 - Comparação entre os valores teóricos e experimentais da rigidez (2)

Efetivamente, os valores de  $EI_{exp}$  não se mantêm totalmente dentro da área limitada pelos valores teóricos  $EI_{I,teo}$  e  $EI_{II,teo}$ , constantes nos diagramas das figuras anteriores. Este fenómeno não é fácil de justificar - poderão existir pequenas diferenças entre o valor de cálculo e o valor real da posição do eixo neutro ( $x$ ), que podem diferenciar largamente os valores da rigidez (teórica e experimental).

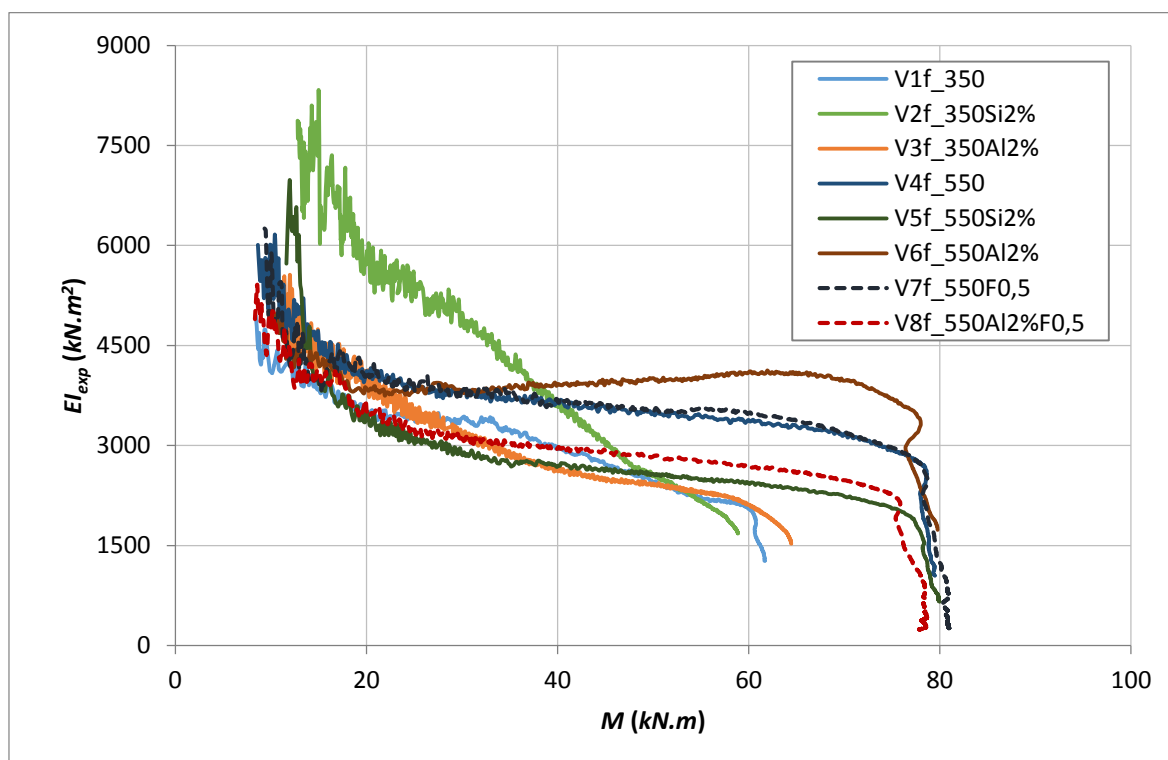


Figura 6.21 – Evolução da rigidez com o momento

Tal como nas Figuras 6.19 e 6.20, a Figura 6.21 demonstra uma evolução da rigidez experimental com os valores dos momentos composta por três regiões:

- a primeira, mais inclinada, com grande variação e perda de rigidez – corresponde ao aparecimento e abertura das fendas;
- a segunda, menos inclinada, com uma perda de rigidez mais lenta e estável – corresponde à evolução, comprimento e largura, das fendas;
- a terceira, onde se verifica uma quebra brusca da rigidez – corresponde à aproximação da fase de rotura.

Os valores iniciais elevados e dispersos da rigidez devem-se essencialmente a dois fatores: ao ajuste da viga relativamente aos apoios, quando se inicia o carregamento, e à baixa precisão de medição dos LVDTs horizontais para deslocamentos muito reduzidos. De uma forma global, a zona inicial dos diagramas de  $EI$  em função de  $M$  é próxima entre todas as vigas, exceto para a viga V2f\_350Si2%. Por outro lado, a zona final indica valores superiores de  $EI$  para as vigas da série 550. Consegue-se, também, constatar que o andamento dos diagramas é semelhante dentro da mesma série. É, ainda, possível visualizar uma variação entre a rigidez inicial e a rigidez final para as vigas da série 550 à das vigas da série 350.

#### 6.2.4. Erro na Medição da Carga Aplicada

Mais uma vez, para perceber os desvios entre os valores do carregamento exercido pelo atuador e do carregamento registado pelas células de carga, apresenta-se o valor do erro, calculado pela Expressão 6.8 do Subcapítulo 6.1.3. O erro global, considerando todas as vigas, tem o valor reduzido de 0,92 %.

#### 6.2.5. Fendilhação e Tipo de Rotura

Neste ponto efetua-se uma descrição da evolução da fendilhação das vigas (em flexão).

Para facilitar a compreensão da evolução da fendilhação ao longo do ensaio nas vigas sujeitas à flexão, apresenta-se a Figura 6.22 (na qual consta o diagrama carga-deslocamento e imagens da fendilhação em dados instantes da viga V4f\_550, a título de exemplo para o caso de vigas sem fibras) e a Figura 6.23 (na qual constam os mesmos elementos só que para a viga V7f\_550F0,5, a título de exemplo para o caso de vigas com fibras). A necessidade da diferenciação, relativamente à incorporação de fibras, é justificada por um comportamento diferenciado nos dois casos: vigas sem fibras têm um comportamento tendencialmente mais frágil, enquanto as vigas com fibras têm um comportamento tendencialmente mais dúctil.

Nos diagramas das figuras mencionadas assinalam-se três pontos: o ponto correspondente ao início do ensaio, onde as vigas não apresentam qualquer tipo de deformação ou fendilhação;

um ponto no patamar ascendente, no “*Estado II*”, em que se nota uma ligeira deformação e uma fendilhação muito reduzida das vigas; e um ponto no patamar de cedência, em que é amplamente visível toda a fendilhação e deformação da viga. Repare-se, além disso, no tamanho/abertura das fendas e na deformação, que é superior na viga com fibras.

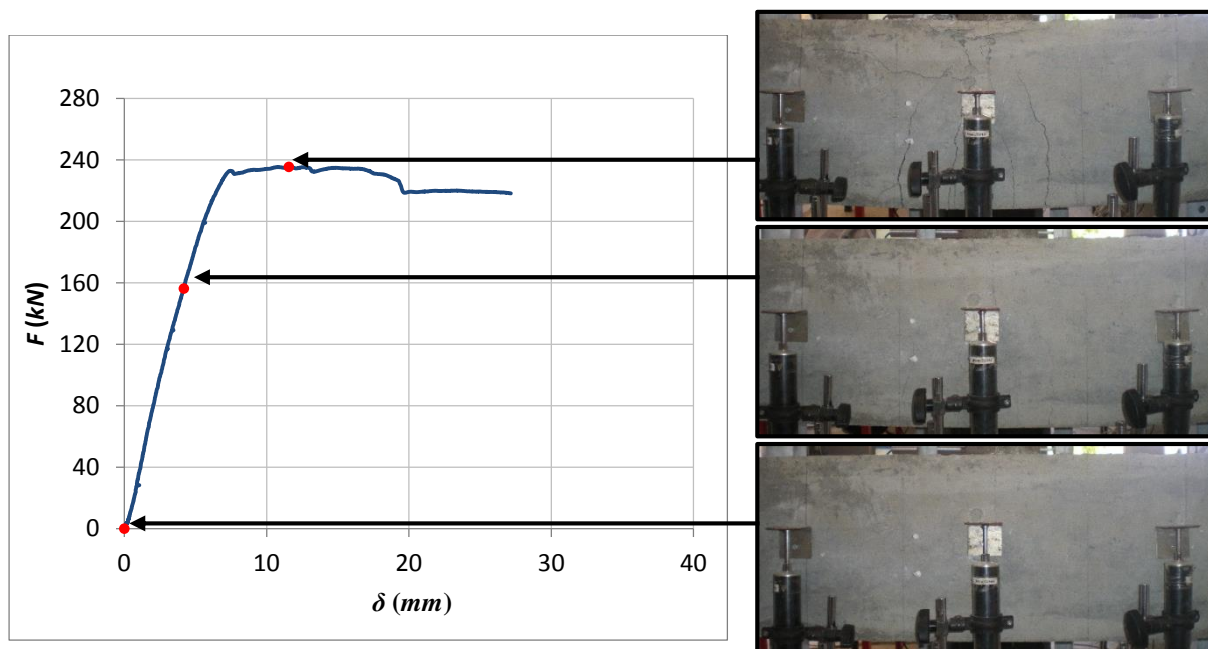


Figura 6.22 – Correspondência entre fendilhação e o diagrama carga-deslocamento – V4f\_550

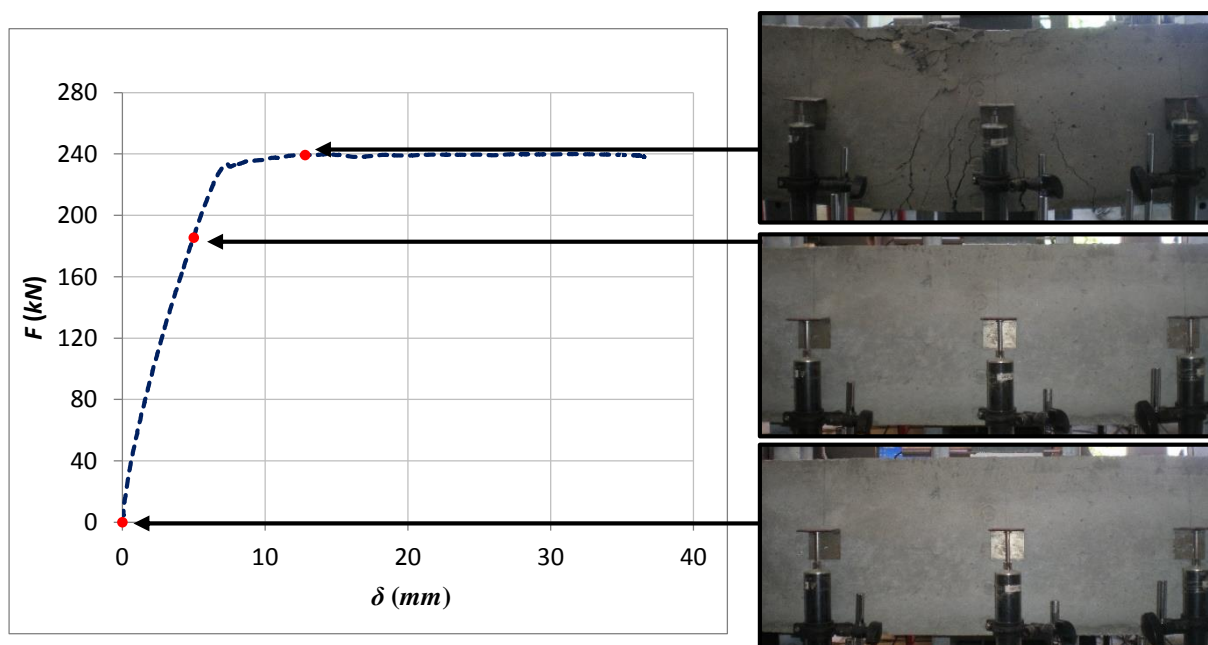
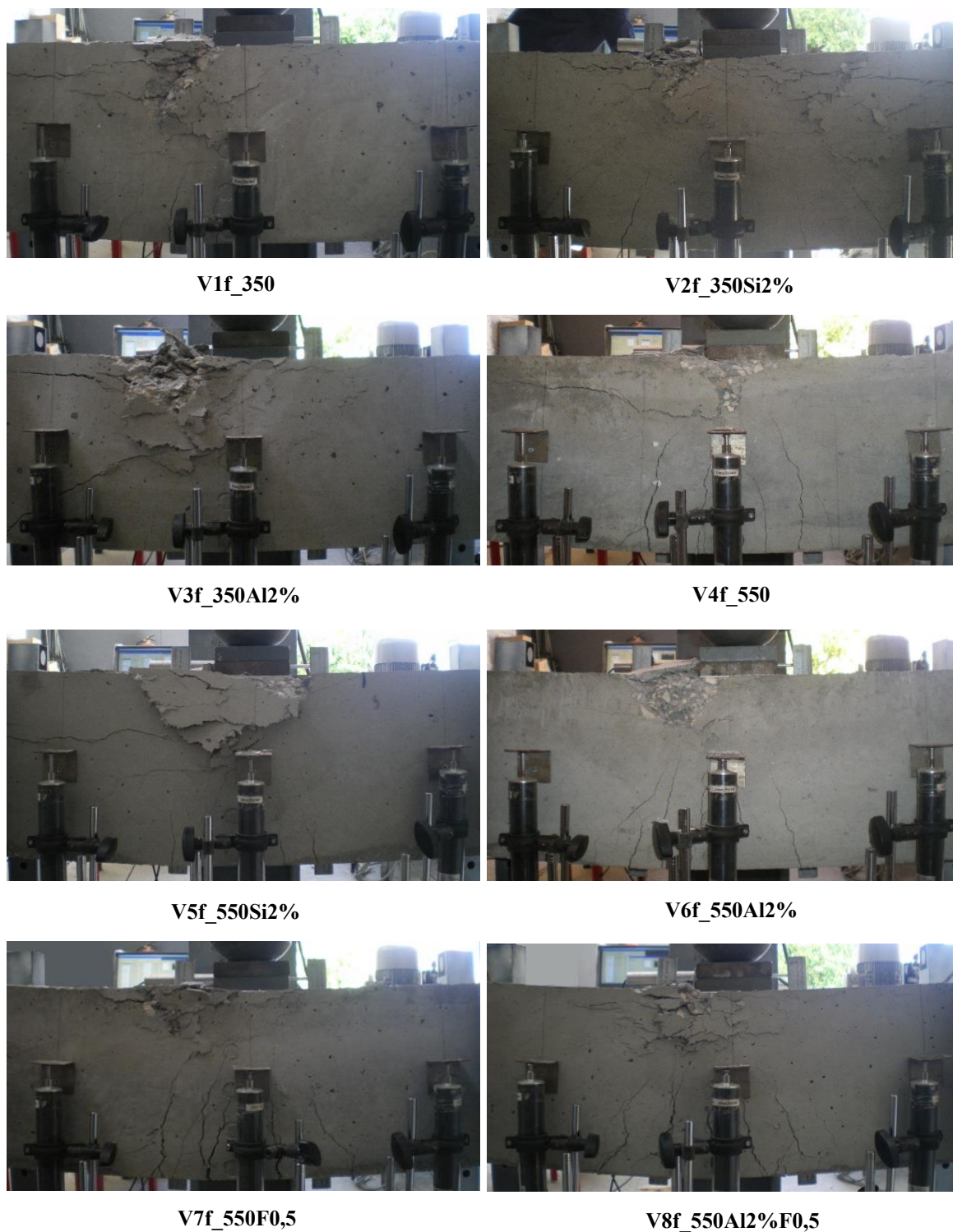


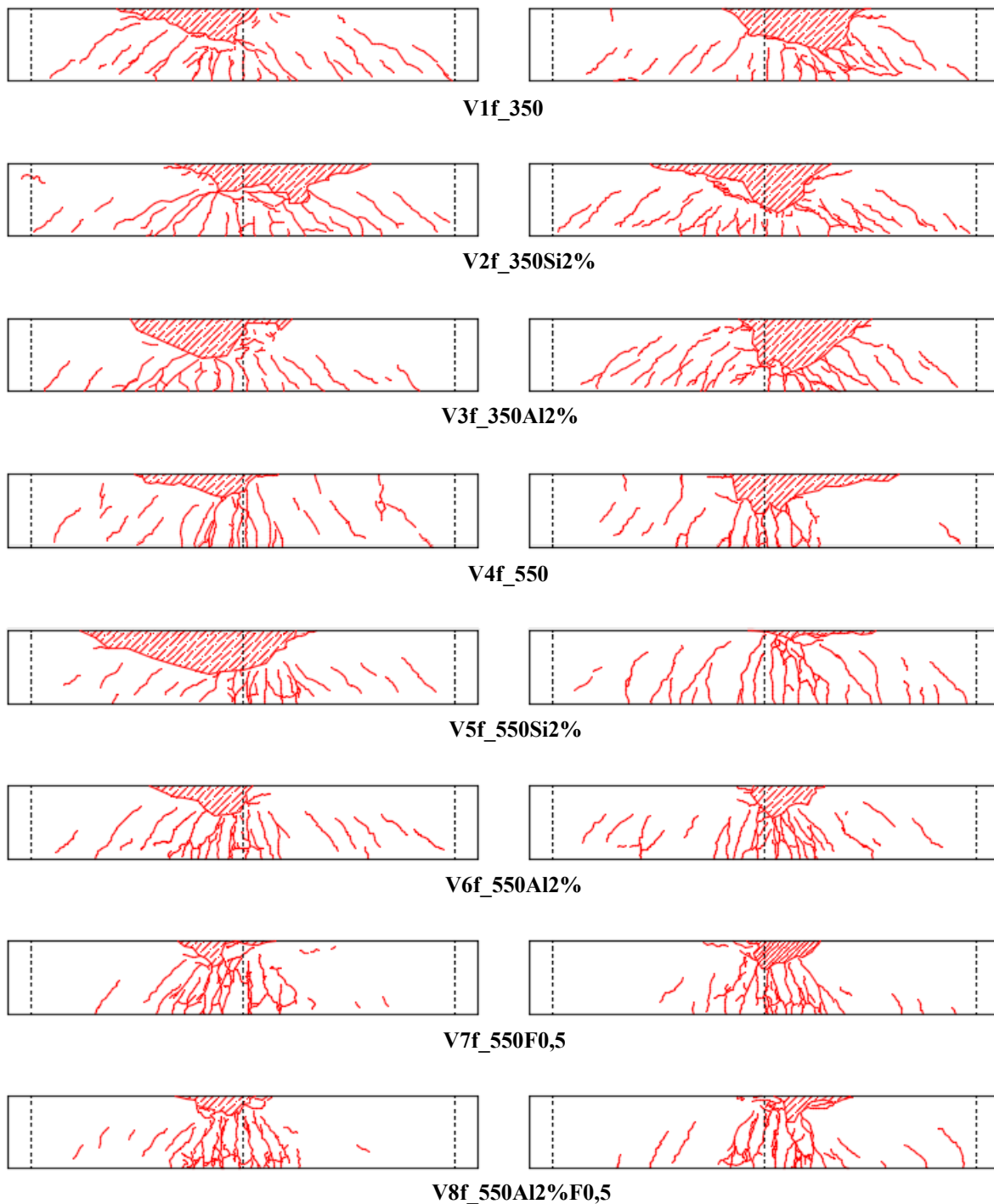
Figura 6.23 – Correspondência entre fendilhação e o diagrama carga-deslocamento – V7f\_550F0,5

Para terminar o estudo da fendilhação, nas vigas ensaiadas à flexão, segue-se a Figura 6.24, com a fendilhação na rotura e imediatamente após a paragem do carregamento.



**Figura 6.24 - Rotura das vigas de ensaio à flexão**

Como nota, revela-se que se ponderou apresentar a fendilhação de todas as vigas de ensaio à flexão em instantes anteriores ao valor de carga máximo (para perceber a sua evolução), mas evidenciou-se que essa fendilhação era reduzida e, por isso, difícil de visualizar.



**Figura 6.25 – Padrão de fendilhação das vigas – ensaio à flexão**



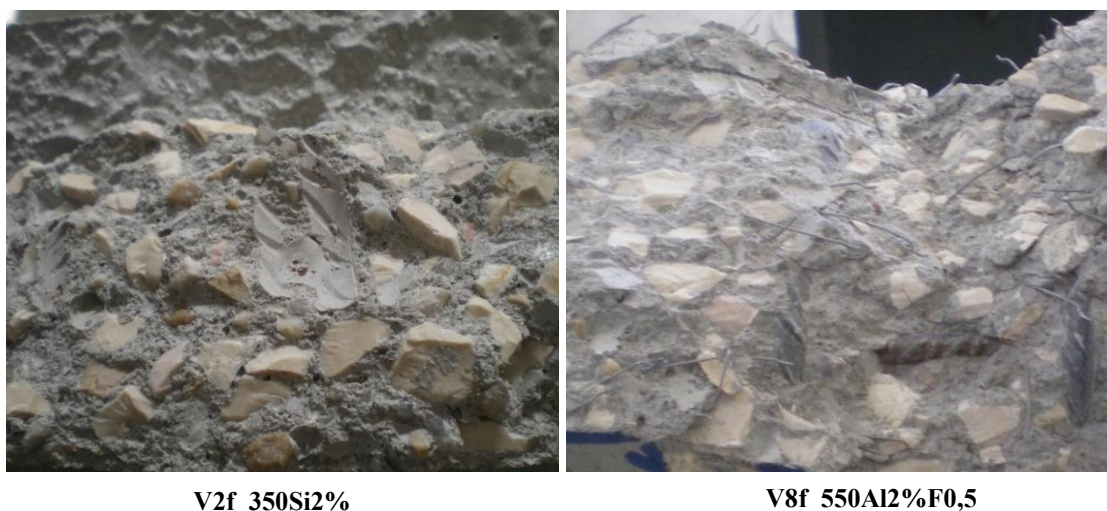
Complementa-se a Figura 6.24 com a configuração final, em CAD®, do padrão de fendilhação em ambas as faces para cada uma das vigas (Figura 6.25). *Nota:* as linhas verticais a tracejado representam, novamente, os locais dos apoios e o ponto de aplicação da carga; no lado esquerdo encontra-se a face que continha os LVDTs verticais e no lado direito a face que continha os LVDTs horizontais.

Pela análise das Figuras 6.24 e 6.25, verifica-se que:

- no momento de rotura, parece existir uma convergência das fendas para a zona onde esta ocorreu (*i.e.* para a zona central);
- as vigas da série 350 ficaram mais danificadas do que as da série 550, chegando a existir um maior destacamento do betão no bordo superior daquelas;
- as fendas das vigas da série 550 surgiram, no geral, com menor desenvolvimento do que as da série 350, tendencialmente;
- as vigas com fibras apresentaram uma distribuição de fendas mais concentrada na zona central e, além disso, uma maior abertura do que nas restantes vigas.

Não obstante, o tipo de rotura foi semelhante em todas vigas, não existindo situações de esmagamento brusco do betão. No entanto, registram-se diferenças com a introdução de fibras (*i.e.* ductilidade). A incorporação de nanopartículas não parece ter grande influência no padrão de fendilhação das vigas de flexão. Esta baixa diferenciação já era expectável tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos betões.

A Figura 6.26 contém o pormenor do destacamento de duas vigas (sem e com fibras) que ajuda a dar uma ideia: de como a matriz se encontra disposta, da aderência entre as armaduras e o betão (veja-se o pormenor da zona onde esteve em contacto a armadura da V2f\_350Si2%), do confinamento do betão dentro das armaduras e da dispersão das fibras dentro das vigas.



**Figura 6.26 – Pormenor do destacamento das vigas de ensaio à flexão**



## Capítulo 7 – Conclusões Principais e Desenvolvimentos Futuros

Para concluir a dissertação, apresentam-se, neste capítulo, as conclusões obtidas ao longo da análise de resultados. Além disso, são indicadas algumas recomendações que poderão ser atendidas em estudos futuros, permitindo uma continuação da análise realizada.

É crucial mencionar que as conclusões apresentadas neste documento são válidas para a situação de ensaio analisada, ou para situações com parâmetros semelhantes. Os resultados obtidos e as conclusões apresentadas não deverão, portanto, ser extrapolados para todos os casos de vigas de betão incorporando nanopartículas (e fibras), podendo conduzir a previsões de comportamento não coincidentes com a realidade. A formulação de conclusões resultantes de um trabalho experimental é um dos pontos mais importantes de um trabalho de investigação, pois estas representam a síntese do trabalho produzido e a crítica dos resultados obtidos. Pode ainda apreciar-se se os objetivos propostos foram, ou não, atingidos.

### 7.1. Conclusões Principais

Com base nos ensaios experimentais de caracterização das misturas de betão podem-se elaborar as seguintes conclusões (comparando com os valores de referência):

- a massa volúmica das misturas não é afetada pela presença de nanopartículas, uma vez que a sua quantidade é muito reduzida (apenas 2 %);
- só a incorporação de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ , na série 350, parece produzir efeitos positivos (ganho de 8 %) na resistência à compressão ( $f_{cm}$ ), sendo que nas restantes misturas a incorporação de nanopartículas não altera ou prejudica ligeiramente esses valores (com perdas a variar entre 0 e 2 %);
- apenas para a série 550, os valores de resistência à tração ( $f_{ctm}$ ) aumentam com a introdução de nanopartículas (ganhos de 21 a 26 % nas misturas sem fibras de aço e de 2 % na mistura com fibras de aço). Na série 350 a incorporação de nanopartículas origina perdas a variar entre 6 a 15 %;
- a incorporação de nanopartículas, quer seja de  $\text{SiO}_2$  quer seja de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , nas misturas sem fibras aço, resultou em ganhos nos valores do módulo de elasticidade ( $E_c$ ) (8 a 27 % na série 350 e cerca de 2 % na série 550), enquanto que a incorporação de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na mistura com fibras de aço induziu uma diminuição de cerca de 9 %;
- no geral, não se consegue estabelecer uma boa correlação entre os valores do módulo de elasticidade ( $E_c$ ) e os valores da resistência à compressão ( $f_{cm}$ ), que deveria existir;
- embora o valor máximo de resistência do betão à flexão ( $f_{ctm,fl}$ ) aumente com a incorporação de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na mistura com fibras de aço (cerca de 11 %), os valores das

resistências residuais finais ( $f_{Rm3}$  e  $f_{Rm4}$ ), mais importantes para a resistência em ensaios estruturais (corte e flexão), sofrem uma quebra de 20 a 29 %.

Com base nos ensaios experimentais para análise do comportamento ao corte foi possível elaborar as seguintes conclusões (comparando com os valores de referência):

- na série 550, a incorporação de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  e de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é responsável por um ganho de 9 e 7 %, respetivamente, do valor de  $F_{m\acute{a}x}$ ;
- nas vigas com fibras de aço, a incorporação de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  resulta numa perda de 32 % no valor de  $F_{m\acute{a}x}$ ;
- como os valores de  $V_{m\acute{a}x}$  estão diretamente relacionados com os valores de  $F_{m\acute{a}x}$ , a tendência é a mesma, ou seja, só a incorporação de nanopartículas  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nas vigas da série 350 e a incorporação de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nas vigas sem fibras da série 550 aumentam a resistência ao corte (ganhos de 3 a 9 %);
- na análise da relação entre a previsão do valor de esforço transversal resistente ( $V_{teo}$ ) e o valor obtido experimentalmente ( $V_{m\acute{a}x}$ ), constatou-se que os valores teóricos foram sempre inferiores aos valores experimentais, com uma diferença elevada;
- não é visível uma correlação entre a incorporação de nanopartículas e a forma como se desenvolve a fendilhação das vigas de ensaio ao corte;
- a rotura foi frágil em todas as vigas, sendo que as vigas com fibras de aço suportaram durante mais tempo a transmissão de cargas;
- a inclinação da fenda de corte ( $\theta_{fenda}$ ) teve valores a rondar os 27 °, em todas as vigas.

Com base nos ensaios experimentais para análise do comportamento à flexão podem-se elaborar as seguintes conclusões (comparando com os valores de referência):

- nas vigas sem fibras de aço, a incorporação de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  e de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (série 350) produz variações não muito significativas nos valores de  $F_{m\acute{a}x}$  (na ordem dos 4,5 %). A tendência é similar na série 550, incluindo as vigas com fibras de aço;
- como os valores de  $M_{m\acute{a}x}$  estão diretamente relacionados com os valores  $F_{m\acute{a}x}$ , a tendência é a mesma;
- na análise da relação entre a previsão do momento resistente ( $M_{teo}$ ) e o valor obtido experimentalmente ( $M_{m\acute{a}x}$ ), constatou-se que os valores teóricos foram sempre inferiores aos valores experimentais, com uma diferença reduzida;

- com base na previsão dos valores de rigidez à flexão ( $EI_{teo}$ ), constatou-se que a introdução de nanopartículas de  $Al_2O_3$  poderia originar um aumento desses valores, para o “Estado I”, essencialmente;
- o tipo de rotura foi semelhante em todas vigas (tendencialmente dúctil), não existindo situações de esmagamento brusco do betão. Só nas vigas com fibras é que o modo de rotura foi ligeiramente diferente;
- a incorporação de nanopartículas também parece não influenciar significativamente o padrão de fendilhação das vigas de ensaio à flexão.

Em suma:

- nas séries 350 a incorporação de nanopartículas de  $SiO_2$  origina perdas na resistência ao corte ( $V_{máx}$ ) (20 %) e na resistência à flexão ( $M_{máx}$ ) (4,5 %) e a incorporação de nanopartículas de  $Al_2O_3$  origina ligeiros aumentos dessas resistências (3 % ao corte e 4,5 % à flexão);
- nas séries 550 a incorporação de nanopartículas de  $SiO_2$  já influencia de forma positiva os valores de resistência ao corte (ganho de 9 %) e à flexão (ganho de apenas 0,5 %). A incorporação de nanopartículas de  $Al_2O_3$  também resulta em ganhos nas resistências (7 % ao corte e apenas 0,5 % à flexão), exceto quando conjugada com fibras de aço. Nesse caso, há uma diminuição dessas resistências (32 % ao corte e 3 % à flexão);
- existem diferenças no efeito da incorporação das nanopartículas (especialmente as nanopartículas de  $SiO_2$ ) em betões com diferentes dosagens de cimento, mas não se identifica, com clareza, a tendência dessa diferença;
- existe uma disparidade entre os efeitos detetados nas propriedades dos betões e os resultados de alguns parâmetros nos ensaios estruturais, que pode ser eventualmente explicada pela reduzida percentagem de nanopartículas (só 2 %), que parece ser insuficiente para produzir um efeito significativo em elementos com dimensões consideráveis como as vigas. A dispersão das nanopartículas no betão, durante a fase de produção das vigas, pode ser uma causa possível para esta diferença de resultados;
- mesmo com algumas dispersões de resultados, existe uma potencialidade de benefícios na resistência ao corte e à flexão com a incorporação de nanopartículas (especialmente das nanopartículas de  $Al_2O_3$ ). Para clarificar estes efeitos é necessária a realização de ensaios com um maior número de vigas iguais, para os resultados serem estatisticamente mais representativos.
- pode-se ainda afirmar que a interação entre as nanopartículas e as fibras de aço produz resultados negativos.

Finalizando, as conclusões apresentadas neste capítulo permitem consolidar e complementar as considerações apresentadas ao longo da análise de resultados. Mais uma vez, alerta-se, para o facto de a amostra utilizada ser pequena (só um exemplar de cada viga), o que acaba por limitar o grau de certeza e a confiança das conclusões obtidas.

## 7.2. Desenvolvimentos Futuros

Existe um elevado potencial do estudo da incorporação das nanopartículas em betões e, por isso, apresentam-se algumas recomendações para possíveis desenvolvimentos futuros:

- realizar um estudo com nanopartículas de origem diferente das utilizadas neste trabalho (*e.g.* utilizando um processo de síntese diferente) e com formas de dispersão distintas;
- utilizar outros tipos de nanopartículas (*e.g.* nanozinco ou nanoferro, entre outros);
- averiguar a interação das nanopartículas com outros tipos de betão (*e.g.* betão estrutural de agregados leves);
- fazer variar o tipo de fibras, o volume e até procurar analisar o efeito da utilização de uma solução híbrida, em conjunto com nanopartículas (*i.e.* dois tipos de fibras diferentes);
- realizar uma investigação semelhante à executada na presente dissertação, mas com uma amostra maior, *i.e.* com mais vigas para cada mistura (*e.g.* 2 ou 3 exemplares);
- fazer variar as composições dos betões, quer a nível das percentagens de nanopartículas quer a nível das quantidades dos agregados e ligantes;
- fazer ensaios para estudar o comportamento estrutural em elementos diferentes dos analisados neste trabalho (*e.g.* lajes, vigas em T, entre outros);
- realizar ensaios com vigas com aplicação de cargas diferente (*e.g.* duas cargas concentradas, gerando uma zona de flexão pura);
- fazer uma análise dos dados de fotogrametria recolhidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI (2015). <https://www.concrete.org/>. American Concrete Institute: Always Advancing, Michigan.
- ACI 544.4R (1988). *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*. ACI Structural Journal, Vol. 85, Issue 5.
- ACI-318 (2014). *Building code requirements for structural concrete*. ACI, Estados Unidos da América.
- Arcelor Mittal (2010). *Dramix® - Aços Longos*. NV Bekaert SA, Zwevegem.
- ASTM C1609 (2012). *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (using Beam with Third-point Loading)*. ASTM, Estados Unidos da América.
- Barros, A. (2009). *Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço*. Tese de Mestrado, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 1 vol.
- Barros, J. (1996). *Caracterização do Comportamento do Betão Reforçado com Fibras de Aço por Intermédio de Ensaaios Experimentais*. 1<sup>as</sup> Jornadas de Estruturas de Betão – Betões de Elevado Desempenho – Novos Compósitos, Porto, pp. 151-170.
- Bentur, A. e Mindess, S. (2006). *Fibre reinforced cementitious composites (2ª Edição)*. CRC Press, Abingdon.
- Birgisson, B., Mukhopadhyay, A., Geary, G., Khan, M. e Sobolev, K. (2012). *Nanotechnology in Concrete Materials: A Synopsis*. Transportation Research E-Circular, E-C170.
- Burda, C., Chen, X., Narayanan, R. e El-Sayed, M. (2005). *Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes*. Chemical reviews, Vol. 105, Issue 4, pp. 1025-1102.
- Bystrejska-Piotrowska, G., Golimowski, J. e Urban, P. (2009). *Nanoparticles: their potential toxicity, waste and environmental management*. Waste Management, Vol. 29, Issue 9, pp. 2587-2595.
- Câmara, J. (2014). *Estruturas de Betão I – Folhas de apoio às aulas*. Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura - Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- CEB-FIP (1990). *Model Code 1990 – Design Code*. CEB, Suíça.
- Collepardi, M., Olagot, J., Skarp, U. e Troli, R. (2002). *Influence of amorphous colloidal silica on the properties of self-compacting concretes*. Proceedings of the International Conference in Concrete Constructions, Dundee, pp. 473-483.

- Costa, A. e Appleton, J. (2002). *Estruturas de Betão I – Parte II - Materiais*. Departamento de Engenharia Civil - Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Dhawan, A., Sharma, V. e Parmar, D. (2009). *Nanomaterials: a challenge for toxicologists*. *Nanotoxicology*, Vol. 3, Issue 1, pp. 1-9.
- Dupont, D. (2003). *Modelling and Experimental Validation of the Constitutive Law ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) and Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete*. Tese de Doutoramento, Catholic University of Leuven, Lovaina, 1 vol.
- EHE-08 (2010). *Code on Structural Concrete*. Ministerio de Fomento, Espanha.
- EN 14651 (2007). *Test method for metallic fibered concrete—measuring the flexural tensile strength*. CEN, Bélgica.
- Ferreira, N. (2008). *Influência das Características das Fibras no Desempenho do Betão*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1 vol.
- Feynman, R. (1960). *There's plenty of room at the bottom*. *Engineering and Science*, Vol. 23, Issue 5, pp. 22–36.
- FIB (2010). *Model Code 2010 – First complete draft – Volume 1*. FIB, Suíça.
- Figueiredo, A. (2011). *Concreto Reforçado com Fibras*. Tese de Livre-docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1 vol.
- Ghafari, E., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A. e Durães, L. (2014). *The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete*. *Materials & Design*, Vol. 59, pp. 1-9.
- Gomes, J. (2013). *Influência das Fibras Metálicas no Comportamento ao Esforço Transverso de Vigas SFRC*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1 vol.
- Grassian, V., O'Shaughnessy, P., Adamcakova-Dodd, A., Pettibone, J. e Thorne, P. (2007). *Inhalation exposure study of titanium dioxide nanoparticles with a primary particle size of 2 to 5 nm*. *Environmental health perspectives*, Vol. 115, Issue 3, pp. 397-402.
- Hassan, T., Mantawy, A., Soliman, J., Sherif, A. e Rizkalla, S. (2012). *Bond Characteristics and Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with High-Strength Steel Reinforcement*. *Advances in Structural Engineering*, Vol. 15, Issue 2, pp. 303-318.
- Heikal, M., Aleem, S. e Morsi, W. (2013). *Characteristics of blended cements containing nano-silica*. *HBRC Journal*, Vol. 9, Issue 3, pp. 243-245.



- Imam, M., Vandewalle, L., Mortelmans, F. e Van Gemert, D. (1997). *Shear domain of fibre-reinforced high-strength concrete beams*. Engineering structures, Vol. 19, Issue 9, pp. 738-747.
- Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M. e Pouladkhan, A. (2012). *Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> micro and nanoparticles*. Materials & Design, Vol. 34, pp.389-400.
- Ji, T. (2005). *Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>*. Cement and Concrete Research, Vol. 35, Issue 10, pp. 1943-1947.
- Leonhardt, F. e Mönnig, E. (1977). *Construções de Concreto: Princípios Básicos do Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado - Volume 1 (1ª Edição)*, Livraria Interciência, Rio de Janeiro.
- Lima, J., Monteiro, V. e Pipa, M. (1989). *Betão armado - Esforços Transversos, de Torção e de Punçãoamento (4ª Edição)*. LNEC, Lisboa.
- LNEC E 397 (1993). *Betões – Determinação do Módulo de Elasticidade em Compressão*. LNEC, Lisboa.
- Löfgren, I. (2005). *Fibre Reinforced Concrete for Industrial Construction – a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*. Tese de Doutorado, Department of Civil and Environmental Engineering - Chalmers University of Technology, Göteborg, 1 vol.
- Lourenço, C., Soldado, E., Costa, H., Carmo, R. e Júlio, E. (2015). *Influência da adição de nano-partículas na reologia e no desempenho de betão auto-compactável*. IV Congresso Ibero-Americano sobre Betão Auto-compactável, FEUP, Porto.
- Lúcio, V. (2006). *Estruturas de Betão Armado I – 7: Resistência ao Esforço Transverso*. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Martins, T., Torgal, F., Aguiar, J. e Jesus, C. (2014). *Utilização de nano-partículas para a obtenção de betões de elevado desempenho*. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, Guimarães, Vol. 1, pp. 179-189.
- Moslemi, A., Khosravi, A., Izadinia, M., e Heydari, M. (2014). *Application of Nano Silica in Concrete for Enhanced Resistance against Sulfate Attack*. Advanced Materials Research, Vol. 829, pp. 874-878.
- Naaman, A. (2003). *Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites*. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, Issue 3, pp. 241-252.

- Nazari, A. e Riahi, S. (2011a). *The effects of ZnO<sub>2</sub> nanoparticles on strength assessments and water permeability of concrete in different curing media*. Materials Research, Vol. 14, Issue 2, pp. 178-188.
- Nazari, A. e Riahi, S. (2011b). *Abrasion resistance of concrete containing SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles in different curing media*. Energy and Buildings, Vol. 43, Issue 10, pp. 2939-2946.
- Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, S. e Khademno, A. (2010). *Mechanical properties of cement mortar with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles*. Journal of American Science, Vol. 6, Issue 4, pp. 94-97.
- Nilson, A., Darwin, D. e Dolan, C. (2010). *Design of Concrete Structures (14ª Edição)*. McGraw-Hill, Nova Iorque.
- NP EN 12390-3 (2011). *Ensaaios de betão endurecido. Parte 3: Resistência à Compressão de provetes de ensaio*. IPQ, Portugal.
- NP EN 12390-5 (2009). *Ensaaios de betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão de provetes*. IPQ, Portugal.
- NP EN 12390-6 (2011). *Ensaaios de betão endurecido. Parte 6: Resistência à Tracção por compressão de provetes*. IPQ, Portugal.
- NP EN 12390-7 (2009). *Ensaaios de betão endurecido. Parte 7: Massa Volúmica do Betão*. IPQ, Portugal.
- NP EN 1992-1-1 (2010). *Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. IPQ, Portugal.
- Oliveira, H. (2012). *Contributos da Nanotecnologia para a Sustentabilidade dos Materiais de Construção*. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Minho, 1 vol.
- Oliveira, H., Torgal, F. e Bragança, L. (2012). *Alguns Contributos da Nanotecnologia para a Sustentabilidade dos Materiais de Construção*. Cincos'12 - Congresso de Inovação na Construção Sustentável, Centro Habitat, Aveiro.
- Oltulu, M. e Sahin, R. (2011). *Single and combined effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume*. Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, Issue 22, pp. 7012-7019.
- Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K. e Rongshen, C. (2007). *Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume*. Construction and Building Materials, Vol. 21, Issue 3, pp. 539-545.

- RILEM (2015). <http://www.rilem.org/>. RILEM: International Union of Laboratories and Experts in Construction materials, Systems and Structures, Paris.
- RILEM TC 162-TDF (2003). *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*. Materials and Structures, Vol. 36, Issue 262, pp. 560-567.
- Robins, P., Austin, S., Chandler, J. e Jones, P. (2001). *Flexural strain and crack width measurement of steel-fibre-reinforced concrete by optical grid and electrical gauge methods*. Cement and Concrete Research, Vol. 31, Issue 5, pp. 719-729.
- Sadrmomtazi, A., Fasihi, A., Balalaei, F. e Haghi, A. (2009). *Investigation of mechanical and physical properties of mortars containing silica fume and nano-SiO<sub>2</sub>*. The third International Conference on Concrete & Development, Teerão, pp. 1153-1161.
- Sanchez, F. e Sobolev, K. (2010). *Nanotechnology in concrete – A review*. Construction and Building Materials, Vol. 24, Issue 11, pp. 2060-2071.
- Si (2014). <http://www.smartinnovation.com/>. Smart Inovation: Nanoscale empowerment, Barcelos.
- Sobolev, K. e Gutiérrez, M. (2005). *How nanotechnology can change the concrete world: Part 2*. American Ceramic Society Bulletin, Vol. 84, Issue 11, pp.16-19.
- Soldado, E., Lourenço, C., Costa, H., Carmo, R. e Júlio, E. (2014). *Influência da adição de nano-partículas no desempenho da matriz do betão*. 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, LNEC, Lisboa.
- Sousa, M. (2014). *Comportamento à flexão de vigas de betão reforçado com fibras de aço*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1 vol.
- Stefanidou, M. e Papayianni, I. (2012). *Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on the Portland cement pastes*. Composites Part B: Engineering, Vol. 43, Issue 6, pp. 2706-2710.
- Taniguchi, N. (1974). *On the basic concept of nano-technology*. Proceedings of International Conference on Production Engineering, Tóquio, Vol.2, pp. 18–23.
- Torgal, F. (2012). *Utilização de nanopartículas no desenvolvimento de betões de elevado desempenho*, Maquinaria, Perspectiva Global, Edição nº 225, pp. 56-62.
- Torgal, F. e Jalali, S. (2011a). *Nanotechnology: advantages and drawbacks in the field of construction and building materials*. Construction and Building Materials, Vol. 25, Issue 2, pp. 582-590.
- Torgal, F. e Jalali, S. (2011b). *Betão eco-eficiente: O futuro da indústria do betão pronto*. Revista de Betão Pronto, APEB, Vol. 26, pp. 22-27.

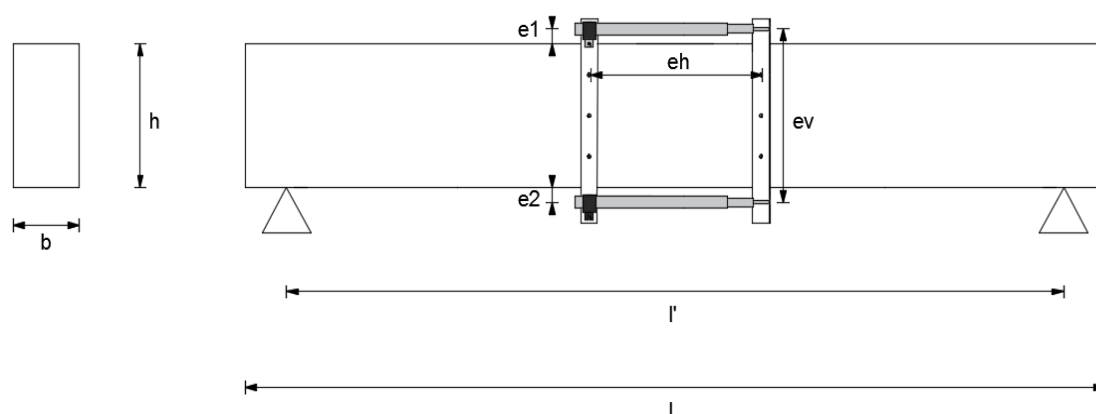
- Vitt, G. (2011). *Understanding Steel Fibre Reinforced Concrete: Dramix® - Guidance to comprehending an extraordinary material*. NV Bekaert SA, Zwevegem.
- Walraven, J. e Vliet, A. (2011). *The 2010 fib Model Code for Concrete Structures: A New Approach in Structural Engineering*. Structural Concrete, Vol. 12, Issue 3, pp. 139-147.
- Zhang, P., Liu, C., Li, Q., Zhang, T. e Wang, P. (2014). *Fracture properties of steel fibre reinforced high-performance concrete containing nano-SiO<sub>2</sub> and fly ash*. Current Science, Vol. 106, Issue 7, pp. 980-986.
- Zhu, W., Bartos P. e Porro, A. (2004). *Application of nanotechnology in construction - Summary of a state-of-the-art report – RILEM TC 197-NCM*. Materials and Structures, Vol. 37, Issue 9, pp. 649-658.
- Zollo, R. (1997). *Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development*. Cement and Concrete Composites, Vol. 19, Issue 2, pp. 107-122.

## Anexo A – Medições das Vigas

No Quadro A.1 apresentam-se as medições mais significativas das vigas, para os ensaios de corte e de flexão, tendo em conta o esquema constante na Figura A.1.

**Quadro A.1 – Medições significativas**

	Viga	$l$ (m)	$l'$ (m)	$b$ (m)	$h$ (m)	$e1$ (m)	$e2$ (m)	$ev$ (m)	$eh$ (m)
Corte	V1c_350	1,550	1,400	0,121	0,244	---	---	---	---
	V2c_350Si2%	1,550	1,400	0,120	0,241	---	---	---	---
	V3c_350Al2%	1,550	1,400	0,119	0,240	---	---	---	---
	V4c_550	1,550	1,400	0,120	0,245	---	---	---	---
	V5c_550Si2%	1,550	1,400	0,120	0,243	---	---	---	---
	V6c_550Al2%	1,550	1,400	0,121	0,245	---	---	---	---
	V7c_550F0,5	1,550	1,400	0,119	0,244	---	---	---	---
	V8c_550Al2%F0,5	1,550	1,400	0,119	0,241	---	---	---	---
Flexão	V1f_350	1,550	1,400	0,120	0,245	0,032	0,033	0,310	0,240
	V2f_350Si2%	1,550	1,400	0,120	0,239	0,032	0,039	0,310	0,260
	V3f_350Al2%	1,550	1,400	0,121	0,236	0,040	0,034	0,310	0,235
	V4f_550	1,550	1,400	0,119	0,245	0,032	0,033	0,310	0,230
	V5f_550Si2%	1,550	1,400	0,122	0,239	0,032	0,039	0,310	0,240
	V6f_550Al2%	1,550	1,400	0,120	0,245	0,032	0,033	0,310	0,260
	V7f_550F0,5	1,550	1,400	0,119	0,244	0,032	0,034	0,310	0,233
	V8f_550Al2%F0,5	1,550	1,400	0,121	0,239	0,034	0,037	0,310	0,225

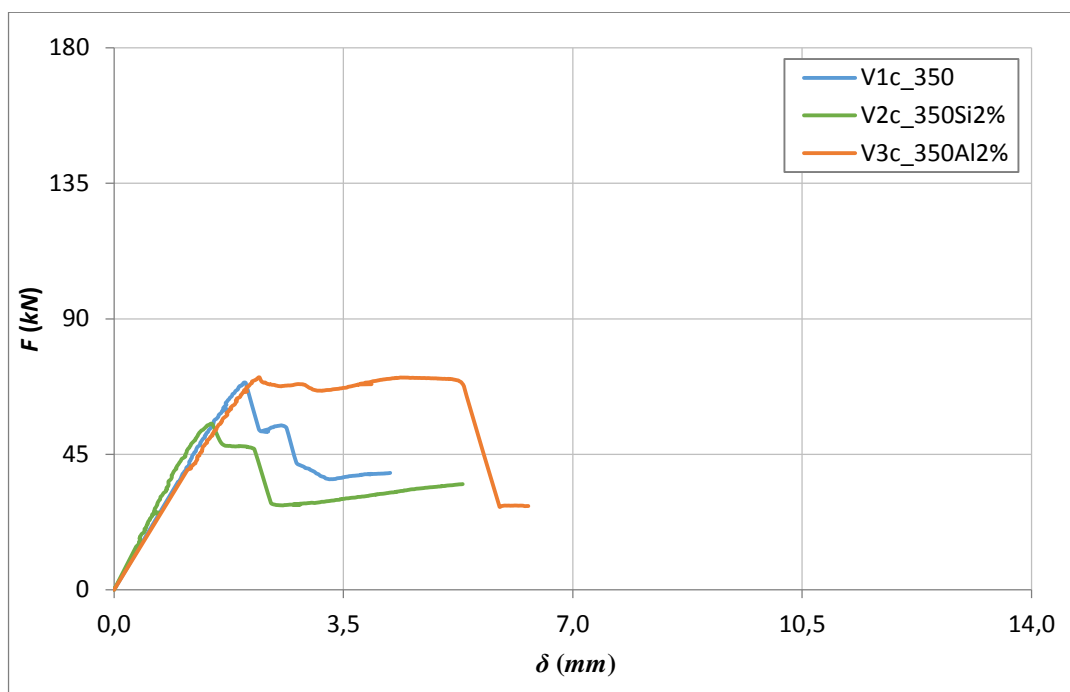


**Figura A.1 – Esquema de medições**

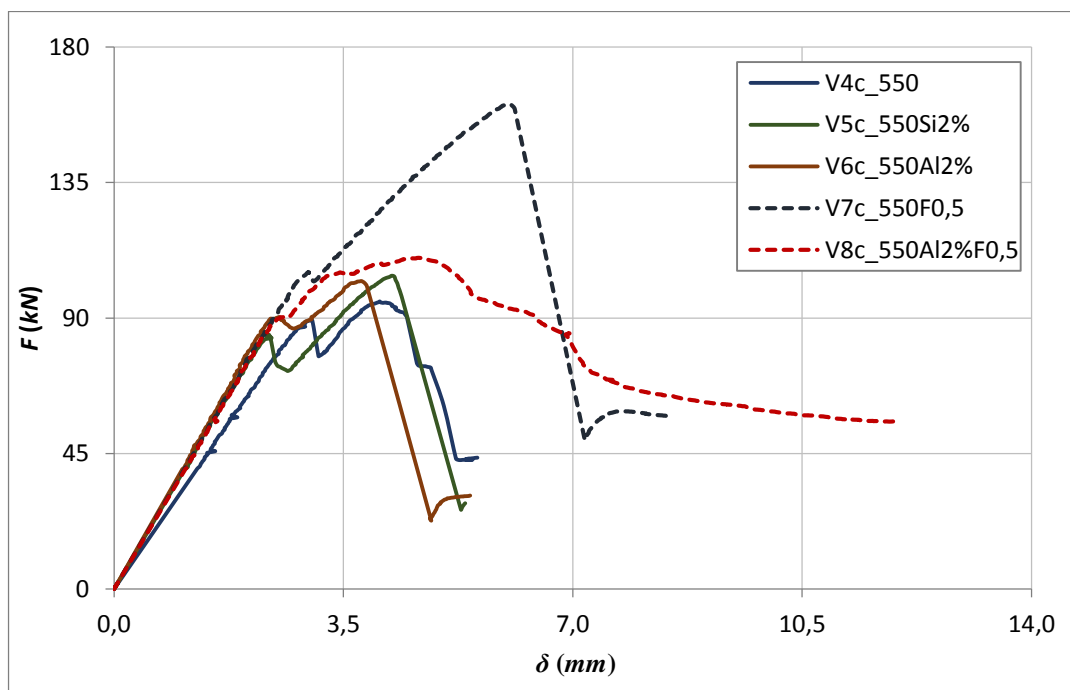


## Anexo B – Relação Carga-Deslocamento – Corte

Nas Figuras B.1 e B.2 apresentam-se os diagramas  $F$ - $\delta$  para as séries 350 e 550, respetivamente, dos ensaios de corte.



**Figura B.1 - Diagramas carga-deslocamento das vigas de ensaio ao corte – Série 350**



**Figura B.2 - Diagramas carga-deslocamento das vigas de ensaio ao corte – Série 550**





## Anexo C – Cálculo do $V_{teo}$

### $V_{teo}$ – Vigas sem fibras

O valor de  $V_{teo}$  das vigas sem fibras foi determinado utilizando a expressão para elementos sem armadura de esforço transversal, constante no EC2 (Expressão C.1).

$$V_{teo}(kN) = [C_{Rd,c} \times k \times (100 \times \rho_l \times f_{cm,cil})^{\frac{1}{3}} + k_1 \times \sigma_{cp}] \times bw \times d \quad (C.1)$$

Com os seguintes cálculos intermédios:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12 \quad (C.2)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (C.3)$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl} \times 10^2}{b_w \times d} \leq 0,02 \quad (C.4)$$

$$k_1 \times \sigma_{cp} = 0 \quad (C.5)$$

Sendo que:

$$V_{teo}(kN) \geq (v_{min} + k_1 \times \sigma_{cp}) \times bw \times d \quad (C.6)$$

$$v_{min} = 0,035 \times k^{\frac{3}{2}} \times f_{cm,cil}^{\frac{1}{2}} \quad (C.7)$$

### $V_{teo}$ – Vigas com fibras

O cálculo do  $V_{teo}$  das vigas com fibras foi feito, tendo em conta a recomendação RILEM TC 162-TDF, através da Expressão C.8.

$$V_{teo}(kN) = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd} \quad (C.8)$$

E com as seguintes componentes:

- contributo do betão

$$V_{cd}(kN) = [C_{Rd,c} \times k \times (100 \times \rho_l \times f_{cm,cil})^{\frac{1}{3}} + k_1 \times \sigma_{cp}] \times bw \times d \quad (C.9)$$

(Calculado utilizando, também, as Expressões C.2 a C.7)

- contributo das fibras

$$V_{fd}(kN) = 0,7 \times k_f \times k_1 \times \tau_{fd} \times b_w \times d \quad (C.10)$$

$$k_f = 1 \text{ (seção rectangular)} \quad (C.11)$$

$$\tau_{fd}(MPa) = 0,12 \times f_{Rm4} \quad (C.12)$$

- contributo dos estribos

$$V_{wd}(kN) = 0 \quad (C.13)$$

, uma vez que não existem estribos na zona de rotura.

*Legenda:*  $C_{Rd,c}$ ,  $k$  e  $k_1$  – coeficientes (EC2);  $\rho_l$  – taxa de armadura longitudinal;  $f_{cm,cil}$  – valor médio da tensão de rotura do betão à compressão (cilindros) (MPa);  $\sigma_{cp}$  – tensão de compressão no betão devida a um esforço normal ou pré-esforço (MPa);  $b_w$  – menor largura da seção transversal na área tracionada (igual a  $b$ ) (mm);  $d$  – altura útil da seção (mm);  $A_{sl}$  – área da armadura de tração (prolongada) (cm<sup>2</sup>);  $k_f$  – fator que tem em conta o contributo dos banzos nas seções em T;  $\tau_{fd}$  – valor de dimensionamento relativo ao aumento da resistência ao corte devido às fibras (MPa);  $f_{Rm4}$  – valor médio da resistência residual à tração por flexão para uma flecha central de 3,02 mm (MPa);

## Anexo D – Relação $V_{m\acute{a}x}$ - $f_{cm,cil}$

Na Figura D.1 consta a relação  $V_{m\acute{a}x} - f_{cm,cil}$ , para ajudar a perceber como a resistência ao esforço transversal das vigas, registada experimentalmente, evolui de acordo com a resistência à compressão.

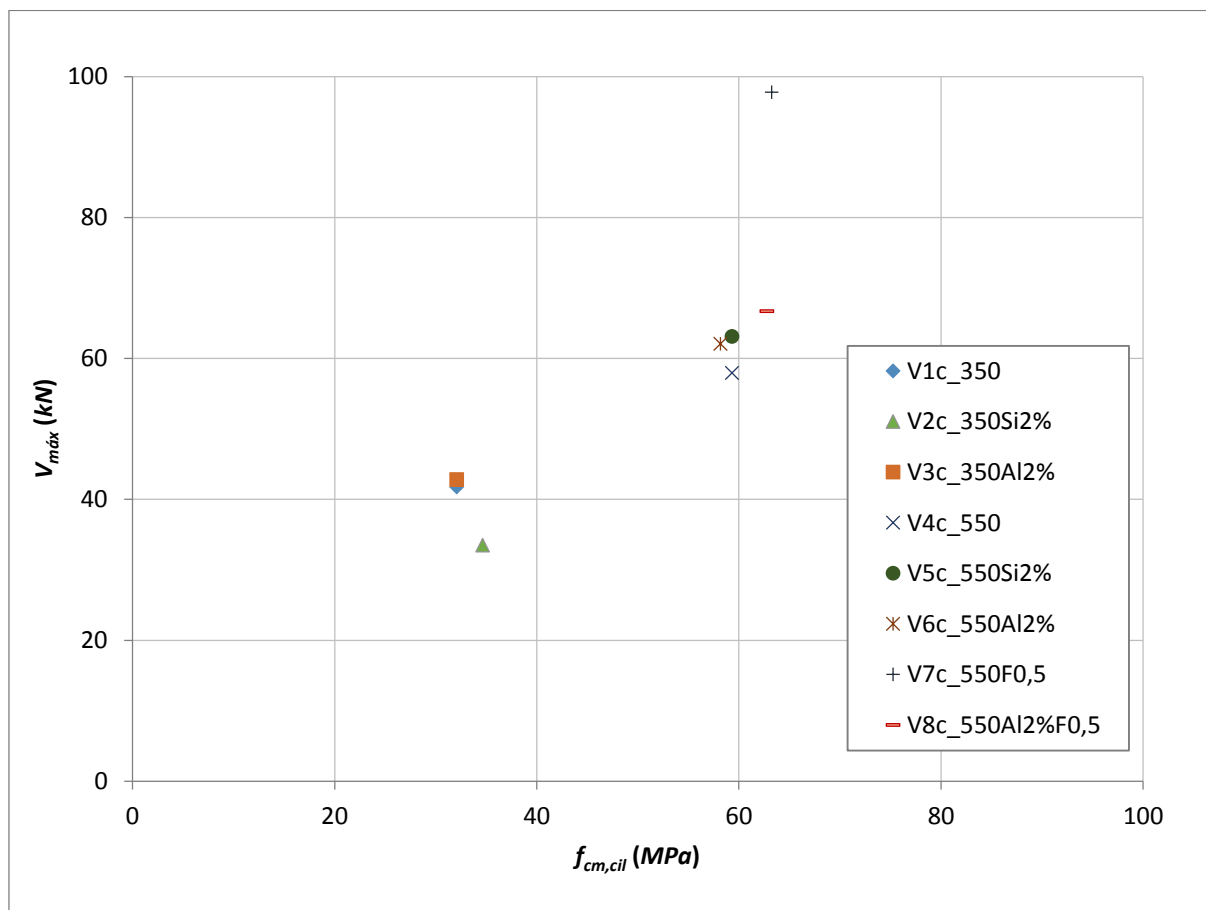
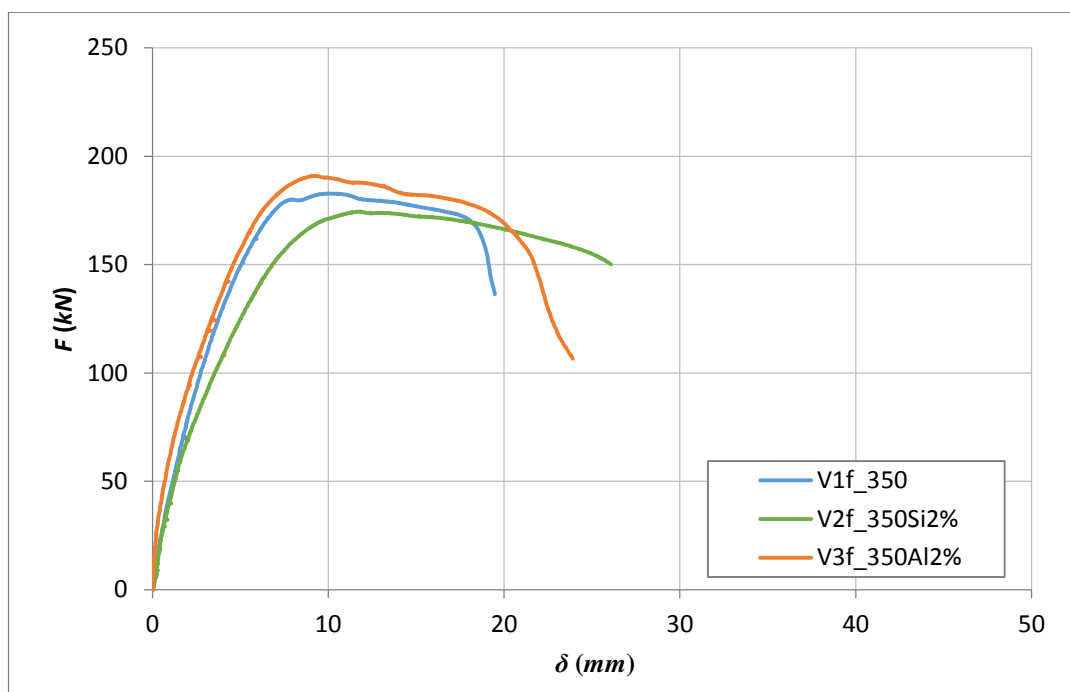


Figura D.1 – Esforço transversal máximo (experimental) em função da resistência à compressão

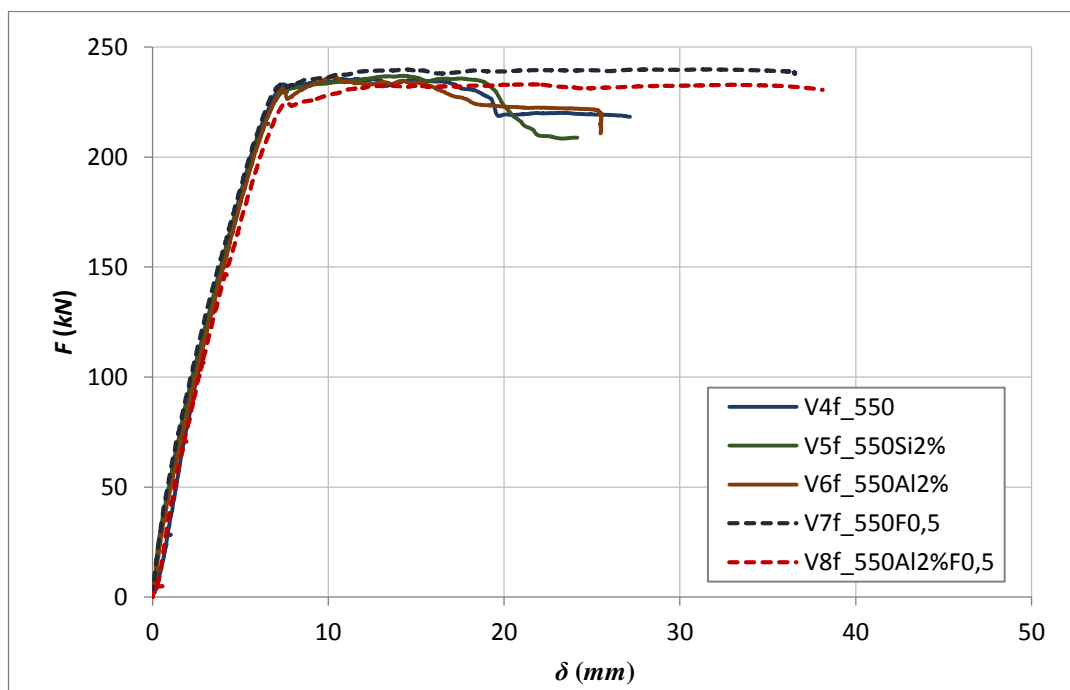


## Anexo E – Relação Carga-Deslocamento - Flexão

Nas Figuras E.1 e E.2 apresentam-se os diagramas  $F-\delta$  para as séries 350 e 550, respetivamente, dos ensaios de flexão.



**Figura E.1 – Diagramas carga-deslocamento das vigas de ensaio à flexão - Série 350**



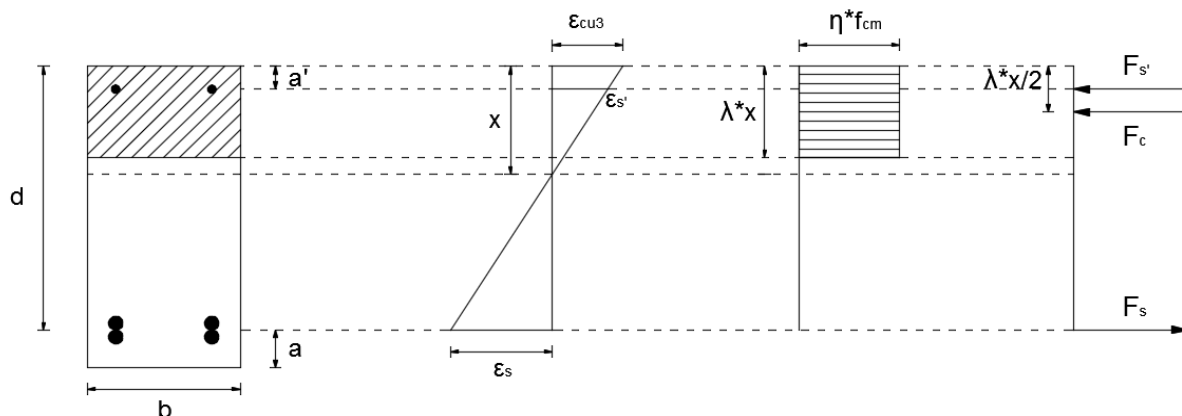
**Figura E.2 – Diagramas carga-deslocamento das vigas de ensaio à flexão - Série 550**



## Anexo F – Cálculo do $M_{teo}$

### $M_{teo}$ – Vigas sem fibras

A determinação do valor de  $M_{teo}$  das vigas sem fibras foi feita de acordo com uma distribuição retangular equivalente de tensões de compressão (Figura F.1), segundo o procedimento preconizado no EC2, como simplificação do diagrama real.



**Figura F.1 – Distribuição tensões para cálculo do  $M_{teo}$  - vigas sem fibras**

Assim,  $M_{teo}$  foi calculado através da Expressão F.1:

$$M_{teo}(kN.m) = F_s' \times (d - a') + F_c \times (d - \frac{\lambda \times x}{2}) \quad (F.1)$$

Com base nos valores parcelares das Expressões F.2 a F.12:

$$\varepsilon_{cu3}(\text{‰}) = 3,5 \quad \text{se } f_{cm,cil} < 50 \text{ MPa} \quad (F.2)$$

$$\varepsilon_{cu3}(\text{‰}) = 2,6 + 3,5 \times \left(\frac{90 - f_{cm,cil}}{100}\right)^4 \quad \text{se } f_{cm,cil} \geq 50 \text{ MPa} \quad (F.3)$$

$$\lambda = 0,8 \quad \text{se } f_{cm,cil} \leq 50 \text{ MPa} \quad (F.4)$$

$$\lambda = 0,8 - \left(\frac{f_{cm,cil} - 50}{400}\right) \quad \text{se } 50 < f_{cm,cil} \leq 90 \text{ MPa} \quad (F.5)$$

$$\eta = 1,0 \quad \text{se } f_{cm,cil} \leq 50 \text{ MPa} \quad (F.6)$$

$$\eta = 1,0 - \left(\frac{f_{cm,cil} - 50}{200}\right) \quad \text{se } 50 < f_{cm,cil} \leq 90 \text{ MPa} \quad (F.7)$$

$$\varepsilon_{sy}(\text{‰}) = \frac{f_{sy}}{E_s \times 10^3} \times 10^3 \quad (F.8)$$

$$\varepsilon_s'(\text{‰}) = \frac{(x - a') \times \varepsilon_{cu3}}{x} \quad (F.9)$$

$$F_s'(kN) = E_s \times 10^6 \times \varepsilon_s' \times 10^{-3} \times A_s' \quad \text{se } \varepsilon_s' < \varepsilon_{sy} \quad (\text{F.10})$$

$$F_s'(kN) = f_{sy} \times 10^3 \times A_s' \quad \text{se } \varepsilon_s' > \varepsilon_{sy} \quad (\text{F.11})$$

$$F_c(kN) = b \times \lambda \times x \times \eta \times f_{cm,cil} \times 10^3 \quad (\text{F.12})$$

O valor de  $x$  foi determinado através de um processo iterativo até obter uma igualdade da Expressão F.13.

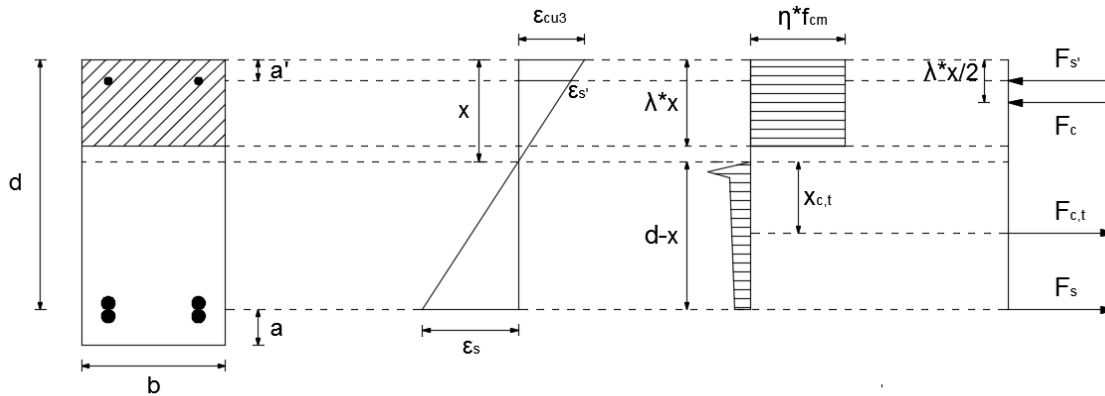
$$F_c + F_s' = F_s \quad (\text{F.13})$$

Com,

$$F_s(kN) = f_{sy} \times 10^3 \times A_s \quad (\text{F.14})$$

### $M_{teo}$ – Vigas com fibras

A determinação do valor de  $M_{teo}$  para as vigas com fibras foi feita de uma forma semelhante para o caso sem fibras, contando-se apenas o contributo adicional para a força de tração resultante da presença das fibras, seguindo a recomendação RILEM TC 162-TDF (Figura F.2).



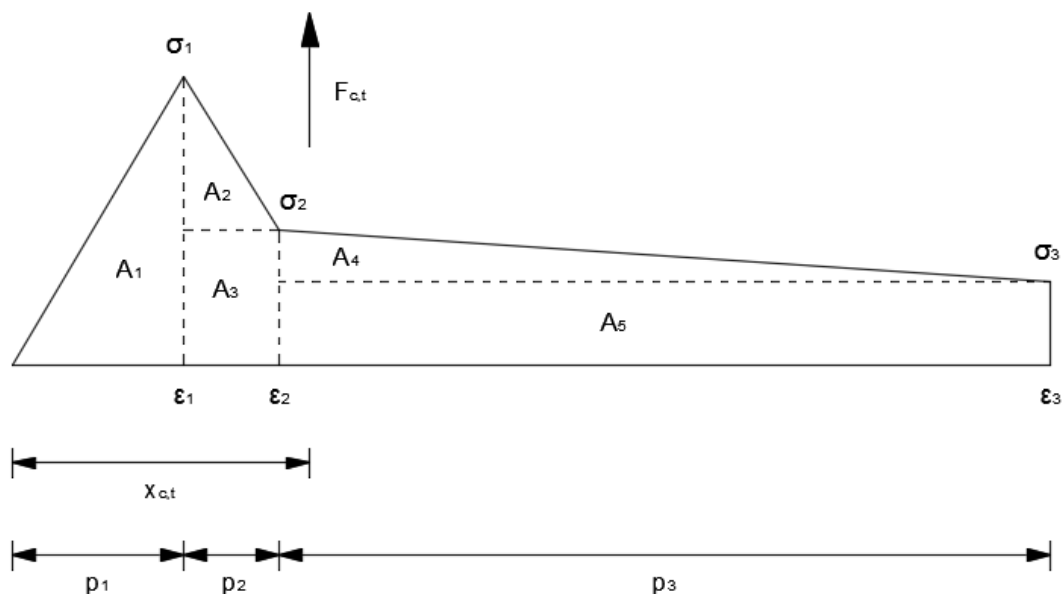
**Figura F.2 - Distribuição de tensões para cálculo do  $M_{teo}$  - vigas com fibras**

O valor de  $M_{teo}$  foi calculado através da Expressão F.15:

$$M_{teo}(kN.m) = F_s' \times (d - a') + F_c \times \left(d - \frac{\lambda \times x}{2}\right) - F_{c,t} \times ((d - x) - x_{c,t}) \quad (\text{F.15})$$



Todos os elementos são calculados utilizando as Expressões F.2 a F.14 contando ainda com a força de tração nas fibras que pode ser calculada utilizando a abordagem ilustrada na Figura F.3.



**Figura F.3 – Diagrama de tensões da componente das fibras**

Se for determinada a área do diagrama de tensões, esta permite obter a força de tração presente nas fibras. Para tal, a recomendação RILEM TC 162 – TDF fornece as seguintes expressões para o cálculo das tensões:

$$\sigma_1 (MPa) = 0,7 \times f_{ctm,fl} \times (1,6 - d) \quad (F.16)$$

$$\sigma_2 (MPa) = 0,45 \times f_{Rm1} \times k_h \quad (F.17)$$

$$\sigma_3 (MPa) = 0,37 \times f_{Rm4} \times k_h \quad (F.18)$$

Com,

$$k_h = 1,0 - 0,6 \times \frac{h \times 100 - 12,5}{47,5}, \quad \text{se } 0,125 \leq h \leq 0,60 \quad (F.19)$$

E as seguintes expressões para o cálculo das extensões:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_c \times 10^3} \quad (F.20)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \frac{0,1}{1000} \quad (F.21)$$

$$\varepsilon_3 = 0,025 \quad (F.22)$$

O cálculo da área do diagrama depende da posição do eixo neutro e o seu cálculo é um processo iterativo, em que é necessário satisfazer a condição:

$$F_c + F_{s'} = F_s + F_{c,t} \quad (F.23)$$

Depois, sabendo que:

$$p_1(m) = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \times (d - x) \quad (F.24)$$

$$p_2(m) = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_3} \times (d - x) \quad (F.25)$$

$$p_3(m) = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_3} \times (d - x) \quad (F.26)$$

a área do diagrama ( $A_{total}$ ) pode ser calculada facilmente através da soma das áreas  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  e  $A_5$ . Assim, a determinação da resultante é feita da seguinte forma:

$$F_{c,t}(kN) = A_{total} \times b \quad (F.27)$$

Já a posição da resultante do diagrama pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$x_{c,t}(m) = \frac{\sum(A_i \times x_i)}{A_{total}} \quad (F.28)$$

*Legenda:*  $F_{s'}$  - força na armadura comprimida (kN);  $d$  - altura útil da seção (m);  $a'$  - distância entre a armadura comprimida e a face superior da seção (m);  $F_c$  - força no betão (kN);  $\lambda$  e  $\eta$  - coeficientes (EC2);  $\varepsilon_{cu3}$  - extensão última do betão (EC2) (‰);  $f_{cm,cil}$  - valor médio da tensão de rotura do betão à compressão (cilindros) (MPa);  $\varepsilon_{sy}$  - valor da extensão de cedência do aço (‰);  $f_{sy}$  - valor da tensão de cedência do aço (MPa);  $E_s$  - valor do módulo de elasticidade do aço (GPa);  $\varepsilon_{s'}$  - valor da extensão do aço da armadura comprimida (‰);  $x$  - profundidade do eixo neutro (m);  $A_{s'}$  - área de aço da armadura comprimida (m<sup>2</sup>);  $b$  - largura da seção (m);  $F_s$  - força na armadura tracionada (kN);  $A_s$  - área de aço da armadura tracionada (m<sup>2</sup>);  $F_{c,t}$  - força de tração nas fibras (kN);  $x_{c,t}$  - posição da força de tração nas fibras (kN);  $f_{ctm,fl}$  - valor médio da tensão de tração por flexão (MPa);  $f_{Rm1}$  - valor médio da resistência residual à tração por flexão para uma flecha central de 0,47 mm (MPa);  $f_{Rm4}$  - valor médio da resistência residual à tração por flexão para uma flecha central de 3,02 mm (MPa);  $k_h$  - coeficiente (RILEM TC 162-TDF);  $h$  - altura da seção (m);  $E_c$  - valor do módulo de elasticidade do betão (GPa);  $A_i$  - áreas dos diagramas -  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  e  $A_5$  (kN/m);  $x_i$  - posição do centro de cada área -  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  e  $x_5$  (m);  $A_{total}$  - área total do diagrama (kN/m).

## Anexo G – Relação $M_{m\acute{a}x} - f_{cm,cil}$

Na Figura G.1 consta a relação  $M_{m\acute{a}x} - f_{cm,cil}$ , para ajudar a perceber como a resistência à flexão das vigas, registada experimentalmente, evolui de acordo com a resistência à compressão.

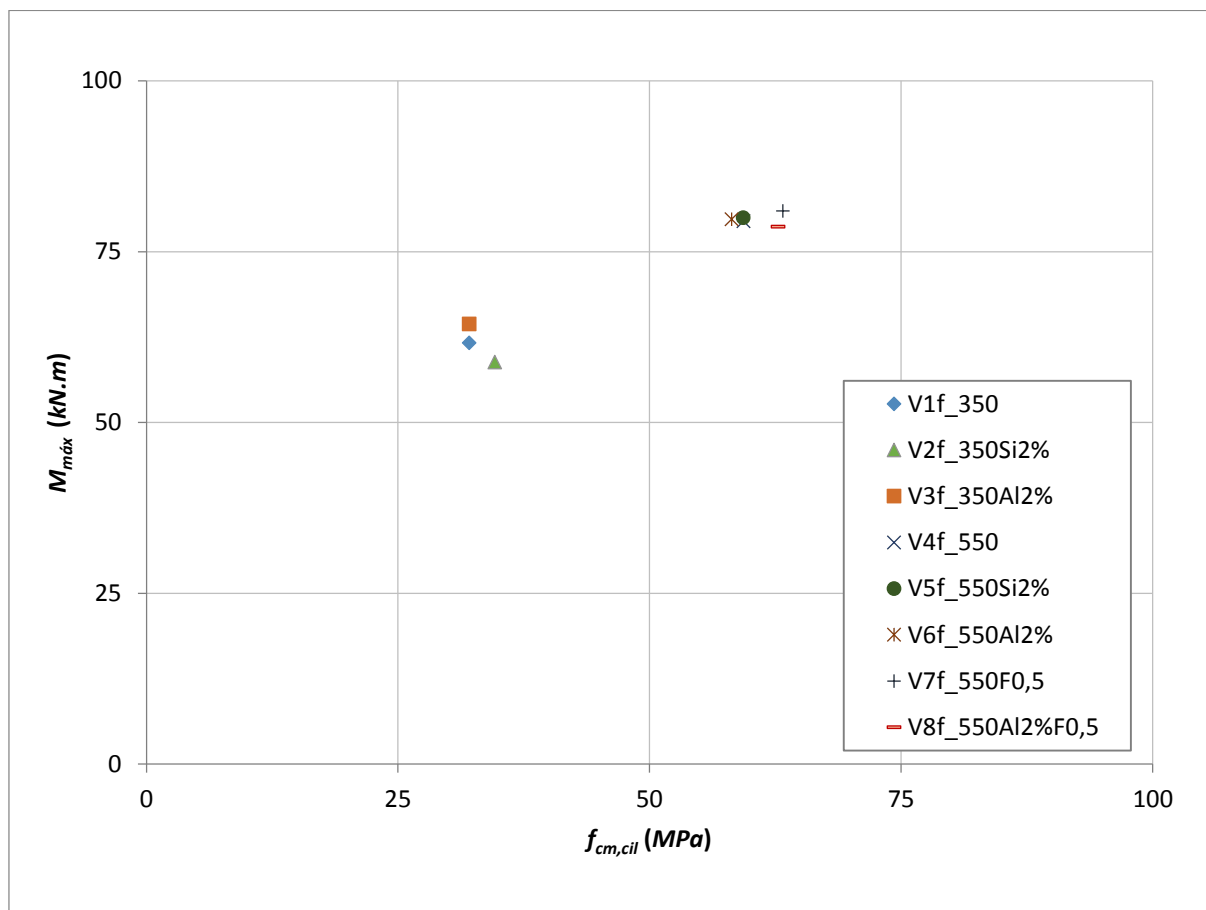
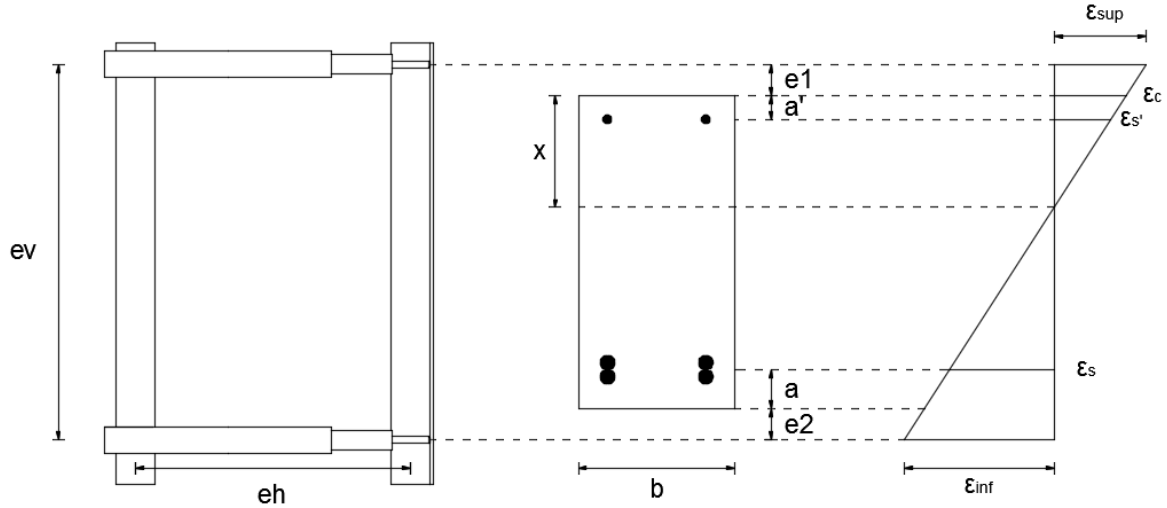


Figura G.1 – Momento máximo em função da resistência à compressão



## Anexo H – Determinação da Curvatura Experimental

A curvatura na região crítica da viga (zona de momentos máximos) foi determinada através dos transdutores de deslocamento horizontais (Figura H.1).



**Figura H.1 – Esquemas para cálculo da curvatura**

Para o cálculo dos valores de curvatura considerou-se:

$$1/r \text{ (m}^{-1}\text{)} = \frac{|\varepsilon_c| + |\varepsilon_s|}{d} \quad (\text{H.1})$$

Mas, na verdade, a curvatura também pode ser calculada da seguinte forma:

$$1/r \text{ (m}^{-1}\text{)} = \frac{|\varepsilon_{sup}| + |\varepsilon_{inf}|}{ev} \quad (\text{H.2})$$

Em que:

$$\varepsilon_{sup} = \frac{\varepsilon_{lvd,t,s}}{eh \times 10^3} \quad (\text{H.3})$$

$$\varepsilon_{inf} = \frac{\varepsilon_{lvd,t,i}}{eh \times 10^3} \quad (\text{H.4})$$

*Legenda:*  $1/r$  - curvatura da seção ( $m^{-1}$ );  $\varepsilon_c$  - valor da extensão no betão;  $\varepsilon_s$  - valor da extensão na armadura tracionada;  $d$  - altura útil da seção ( $m$ );  $\varepsilon_{sup}$  - valor da extensão superior;  $\varepsilon_{inf}$  - valor da extensão inferior;  $ev$  - distância, medida na vertical, entre os LVDTs horizontais ( $m$ );  $\varepsilon_{lvd,t,s}$  - valor da extensão medida no LVDT horizontal superior ( $mm$ );  $\varepsilon_{lvd,t,i}$  - valor da extensão medida no LVDT horizontal inferior ( $mm$ );  $eh$  - comprimento medido na horizontal, dos LVDTs horizontais ( $m$ );

## Anexo I – Relação $M - 1/r$

Nas Figuras I.1 e I.2 apresentam-se os diagramas  $M-1/r$  para as séries 350 e 550, respetivamente, dos ensaios de flexão.

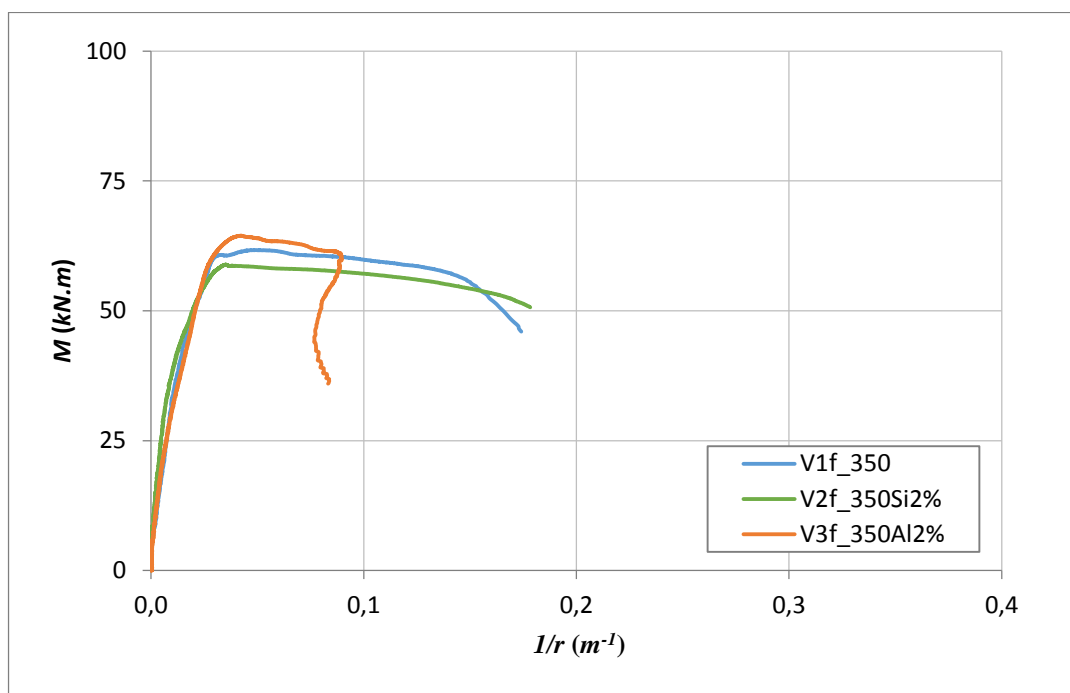


Figura I.1 - Diagramas momento-curvatura – Série 350

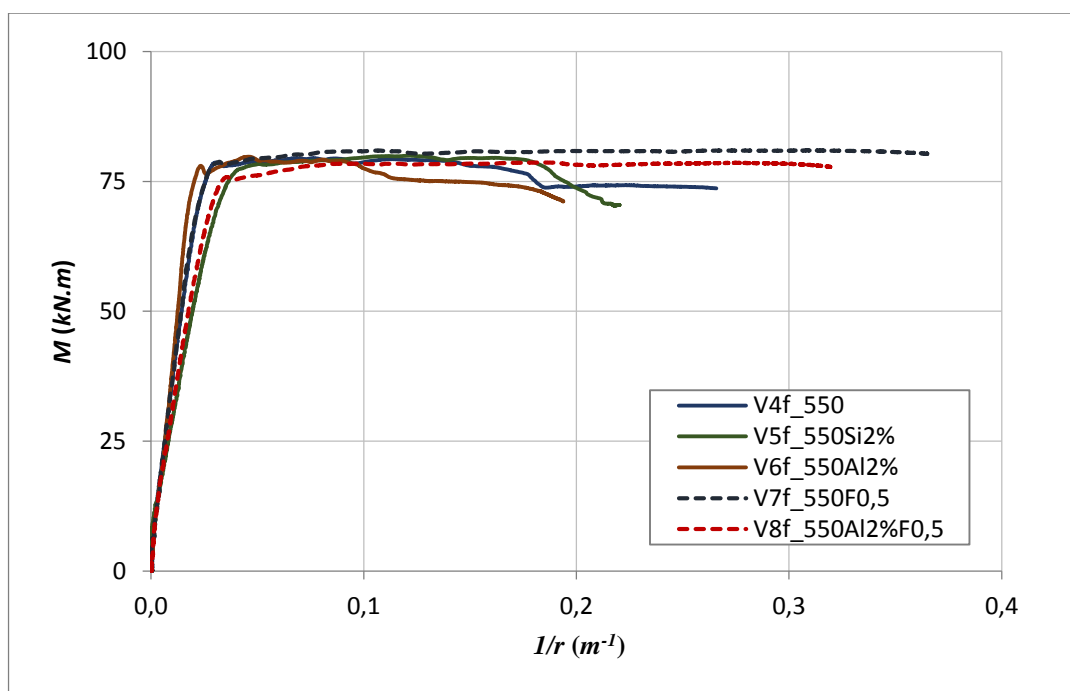


Figura I.2 - Diagramas momento-curvatura – Série 550





## Anexo J – Cálculo do $EI_{I,teo}$ e do $EI_{II,teo}$

O cálculo da rigidez teórica ( $EI_{I,teo}$  e  $EI_{II,teo}$ ) realiza-se da mesma forma para todas as vigas, quer sejam sem fibras ou com fibras.

### Rigidez “Estado I”

A previsão teórica do valor da rigidez para o “Estado I” ( $EI_{I,teo}$ ) foi feita considerando a secção de betão homogeneizada.

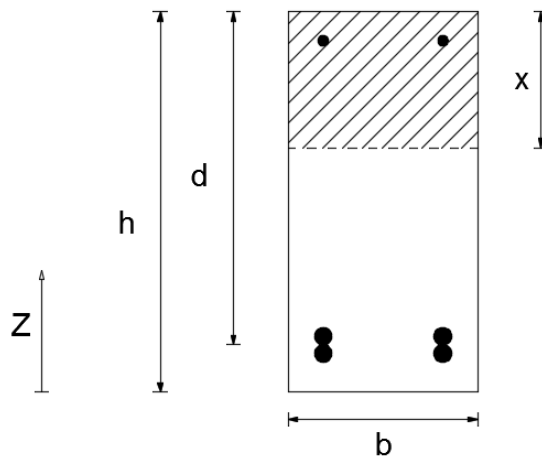


Figura J.1 – Esquema para o cálculo da inércia

O cálculo do valor de  $EI_{I,teo}$  baseou-se na informação da Figura J.1 e na seguinte genealogia:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c} \quad (J.1)$$

$$A_{bet\tilde{a}o}(m^2) = b \times h \quad (J.2)$$

$$A_{s,homog.}(m^2) = \alpha \times A_s \quad (J.3)$$

$$A_{s,homog.}'(m^2) = \alpha \times A_s' \quad (J.4)$$

$$Z_G(m) = \frac{A_{bet\tilde{a}o} \times Z_{bet\tilde{a}o} + A_{s,homog.} \times Z_{As} + A_{s,homog.}' \times Z_{As}'}{A_{bet\tilde{a}o} + A_{s,homog.} + A_{s',homog.}} \quad (J.5)$$

$$I_{bet\tilde{a}o}(m^4) = \frac{b \times h^3}{12} + A_{bet\tilde{a}o} \times (Z_{bet\tilde{a}o} - Z_G)^2 \quad (J.6)$$

$$I_{As}(m^4) = A_{s,homog.} \times (Z_{As} - Z_G)^2 \quad (J.7)$$

$$I_{As}'(m^4) = A_{s,homog.}' \times (Z_{As}' - Z_G)^2 \quad (J.8)$$

$$I_{total}(m^4) = I_{betão} + I_{As} + I_{As}' \quad (J.9)$$

$$EI_{I,teo}(kN.m^2) = E_c \times I_{total} \quad (J.10)$$

### Rigidez “Estado II”

O primeiro passo para a previsão da rigidez para o “Estado II” ( $EI_{II,teo}$ ), com homogeneização, consiste em determinar o valor de  $x$  (posição do eixo neutro em fase fendilhada) a partir da seguinte igualdade:

$$x(m) = \frac{b \times \frac{x^2}{2} + A_{s,homog.} \times (h - Z_{As}) + A_{s',homog.} \times (h - Z_{As'})}{A_{betão} + A_{s,homog.} + A_{s',homog.}} \quad (J.11)$$

Sendo que os restantes passos se incluem em subscrito:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c} \quad (J.12)$$

$$A_{betão}(m^2) = b \times x \quad (J.13)$$

$$A_{s,homog.}(m^2) = \alpha \times A_s \quad (J.14)$$

$$A_{s',homog.}(m^2) = \alpha \times A_{s'} \quad (J.15)$$

$$Z_G(m) = \frac{A_{betão} \times (h - \frac{x}{2}) + A_{s,homog.} \times Z_{As} + A_{s',homog.} \times Z_{As'}}{A_{betão} + A_{s,homog.} + A_{s',homog.}} \quad (J.16)$$

$$I_{betão}(m^4) = \frac{b \times x^3}{12} + A_{betão} \times ((h - \frac{x}{2}) - Z_G)^2 \quad (J.17)$$

$$I_{As}(m^4) = A_{s,homog.} \times (Z_{As} - Z_G)^2 \quad (J.18)$$

$$I_{As'}(m^4) = A_{s',homog.} \times (Z_{As'} - Z_G)^2 \quad (J.19)$$

$$I_{total}(m^4) = I_{betão} + I_{As} + I_{As'} \quad (J.20)$$

$$EI_{II,teo}(kN.m^2) = E_c \times I_{total} \quad (J.21)$$

*Legenda:*  $\alpha$  – coeficiente de homogeneização;  $E_s$  – valor do módulo de elasticidade do aço (GPa);  $E_c$  – valor do módulo de elasticidade do betão (GPa);  $A_{betão}$  – área de betão ( $m^2$ );  $b$  – largura da seção (m);  $h$  – altura da seção (m);  $A_{s,homog.}$  – área de aço das armaduras

tracionadas homogeneizadas ( $m^2$ );  $A_s$  – área de aço da armadura tracionada ( $m^2$ );  $A_{s,homog.}'$  – área de aço das armaduras comprimidas homogeneizadas ( $m^2$ );  $A_{s'}$  - área de aço da armadura comprimida ( $m^2$ );  $Z_G$  – centro de inércia da seção ( $m$ );  $Z_{betão}$  – distância entre a base da seção e o centro da zona de betão considerada ( $m$ );  $Z_{As}$  - distância entre a base da seção e o centro das armaduras tracionadas ( $m$ );  $Z_{As}'$  - distância entre a base da seção e o centro das armaduras comprimidas ( $m$ );  $I_{betão}$  – inércia do betão relativamente ao centro de gravidade da seção ( $m^4$ );  $I_{As}$  - inércia das armaduras tracionadas relativamente ao centro de gravidade da seção ( $m^4$ );  $I_{As}'$  - inércia das armaduras comprimidas relativamente ao centro de gravidade da seção ( $m^4$ );  $I_{total}$  – Inércia total ( $m^4$ );  $EI_{I,teo}$  – rigidez (teórica) da seção para o “Estado I” ( $kN.m^2$ );  $x$  – profundidade do eixo neutro (em fase fendilhada) ( $m$ );  $EI_{II,teo}$  – rigidez (teórica) da seção para o “Estado II” ( $kN.m^2$ ).

